

ОРГАНИЧЕСКИЙ УГЛЕРОД В ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ПОБЕРЕЖЬЯ КАРСКОГО МОРЯ

И.Д. Стрелецкая, А.А. Васильев*, М.З. Каневский*, Б.Г. Ванштейн**, Р.С. Широков*

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический ф-т,
119992, Москва, Воробьевы горы, Россия, strelets@gol.ru*

**Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия*

***Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана,
190121, Санкт-Петербург, Английский пр., 1, Россия*

Приведены данные о содержании органического углерода в четвертичных отложениях западного и восточного секторов побережья Карского моря. Органический углерод в глинистых отложениях морского генезиса присутствует преимущественно в рассеянном состоянии. Содержание органического углерода может служить дополнительным индикатором палеогеографических условий осадконакопления. В среднелейстоценовых глинистых отложениях оно примерно одинаково в западном и восточном секторах и в целом меньше, чем в верхнелейстоценовых. В западном секторе содержание органического углерода в верхнелейстоценовых отложениях выше, чем в восточном. Это объясняется их разными региональными палеогеографическими условиями.

Побережье Карского моря, органический углерод, четвертичные отложения, палеогеографические условия

ORGANIC CARBON IN THE COASTAL QUATERNARY SEDIMENTS OF THE KARA SEA

I.D. Streletskaia, A.A. Vasiliev*, M.Z. Kanevskiy*, B.G. Vanstein**, R.S. Shirokov*

*Lomonosov Moscow State University, Department of Geography,
119992, Moscow, Vorobyovy Gory, Russia, strelets@gol.ru*

**Earth Cryosphere Institute SB RAS, 625000, Tyumen, P/O box 1230, Russia*

***All-Russian Research Institute for Geology and Mineral Resources of the World Ocean,
190121, St.-Petersburg, Angliyskiy pr., 1, Russia*

The paper presents the results of investigations of organic carbon content in the Quaternary sediments of eastern and western sectors of the Kara sea coast. Organic carbon in marine clay sediments occurs mostly in a dispersed form. Organic carbon content can serve as an additional marker of paleogeographic conditions. Organic carbon content found in Middle Pleistocene sediments is similar both to eastern and western sectors. Late Pleistocene sediments are characterized by a higher organic content than Middle Pleistocene sediments. At the same time the organic content is higher in the western sector than in the eastern one. This distribution can be explained by regional differentiation of paleoconditions in which the sediments have been formed.

Kara Sea coast, organic carbon, Quaternary sediments, paleogeographic conditions

ВВЕДЕНИЕ

Содержание органического углерода в четвертичных отложениях на побережье арктических морей представляет собой важнейшую характеристику при оценке взаимодействия суши и моря в криолитозоне, а также в связи с условиями существования морской биоты в прибрежной зоне [Лисицын, 1994, 2002]. Органический углерод ($C_{\text{орг}}$), поступающий с твердыми осадками в море при разрушении берегов, является одним из источников ее питания. Количество, химическая форма и распределение $C_{\text{орг}}$ в прибрежно-морских отложениях являются важными параметрами, влияющими на экологию прибрежной биоты.

В последние годы в связи с проблемой глобального потепления климата исследованию выноса органического углерода в арктические моря и его

трансформации уделяется особое внимание, опубликовано большое количество работ [Петрова, 2001; Rachold et al., 2000; Brown, Jorgenson, 2002; Grigoriev, Rachold, 2003]. Крупное обобщение по циклу органического углерода в морях Российской Арктики было выполнено Е.А. Романкевичем и А.А. Ветровым [2001]. Представлены предварительные оценки выноса $C_{\text{орг}}$ в арктический бассейн вследствие разрушения морских берегов [Органическое..., 1990; Кошелева, Яшин, 1999]. Цикл органического углерода в арктических морях более детально был рассмотрен Р. Штайном и Р. Макдональдом [Stein, Macdonald, 2003]. Но и здесь оценки поступления $C_{\text{орг}}$ за счет разрушения морских берегов в западном секторе Российской Арктики фактически основываются на весьма ограниченных данных.

По результатам собственных полевых исследований и литературным данным ранее было приближенно оценено содержание $C_{\text{орг}}$ в прибрежно-морских отложениях Карского моря [Васильев, 1999, 2004].

Одним из источников информации о содержании органического углерода в четвертичных отложениях могут служить данные инженерно-геологических исследований, основанные на определениях потерь при прокаливании пород [Полуостров Ямал..., 1975; Природные..., 1997]. Оценка потерь при прокаливании является стандартной процедурой при инженерно-геологических исследованиях любой детальности. Можно найти довольно много данных о таких потерях для пород четвертичного возраста. Однако к этим данным следует относиться с осторожностью, поскольку потери при прокаливании глинистых пород практически всегда превышают содержание $C_{\text{орг}}$, и полученные данные будут завышены.

Детальные исследования содержания органического вещества в дисперсных четвертичных отложениях выполнены для районов побережий морей Лаптевых и Восточно-Сибирского в ИФХБПП РАН [Холодов и др., 2003]. В этом регионе практически все четвертичные отложения представлены континентальными образованиями. Отложения морского генезиса в береговых обрывах встречаются крайне редко. Содержание органического углерода в кучугуйских (среднеплейстоценовых) и казанцевских (верхнеплейстоценовых) отложениях составляет 0,99 и 0,92 % соответственно. Наибольшее распространение имеет ледовый комплекс супесчаного состава и супесчано-суглинистые аласные накопления. Органическое вещество в отложениях ледового комплекса и аласов содержится в виде растительных остатков и сложных органических соединений (органических кислот и т. п.) и характеризуется высоким содержанием, которое достигает 5 % и более в горизонтах погребенных почв [Губин, 2002]. Отмечается, что длительное пребывание отложений в оттаявшем состоянии существенно сказывается на содержании органического углерода [Холодов и др., 2003]. В таберальных отложениях содержание $C_{\text{орг}}$ всегда значительно ниже, чем в исходных отложениях ледового комплекса [Ostrov et al., 2005]. Это вполне естественно для сравнительно неустойчивых форм органического вещества в континентальных дисперсных отложениях.

Изучение многочисленных геологических разрезов на побережье Карского моря выявляет меньшее содержание органического вещества в форме растительных остатков по сравнению с восточным сектором Российской Арктики. Берего-

вые обрывы Карского моря сложены морскими и прибрежно-морскими засоленными отложениями песчано-глинистого состава. В верхней части разрезов встречаются маломощные (до 1–2 м) голоценовые торфяники. Если для песчаных отложений характерны видимые включения растительных остатков (в виде растительного детрита, намывного торфа и обломков древесины), то в глинистых отложениях $C_{\text{орг}}$ присутствует и в других формах.

Цель настоящей работы – изучение количественного содержания органического углерода в четвертичных отложениях и его пространственного распределения для расчета поступления его в Карское море при разрушении морских берегов и региональных палеогеографических реконструкций.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изучение и опробование разрезов четвертичных отложений на содержание органического углерода проведено нами в западном (м. Шпиндлер¹, полярная станция (п/с) Марре-Сале) и восточном (район г. Дудинка, урочище Красный Яр, п/с Сопочная Карга, м. Шайтанский) секторах побережья Карского моря.

Мыс Шпиндлер. Обнажение м. Шпиндлера расположено на морском побережье в центральной части Югорского п-ова. Территория представляет собой грядово-холмистую равнину с абсолютными отметками 40–55 м. Высота берегового клифа составляет 20–45 м. Первое детальное изучение геологического и геокриологического строения разреза выполнено Ю.И. Гольдфарбом и А.Б. Ежовой [1990]. Морской берег сложен морскими и ледниково-морскими глинистыми отложениями с прослоями песков. Предполагается, что изначально морские отложения подвергались воздействию позднего оледенения и полностью или частично были переработаны мощным ледником. Поэтому та часть глинистых отложений, которая несет следы ледникового воздействия, в генетическом отношении интерпретируется как диамиктон, а песчаные отложения трактуются как флювиогляциальные [Manley et al., 2001]. Главная особенность геокриологического строения разреза – присутствие двух мощных ледяных пластов. Протяженность ледяных тел составляет 300–500 м, мощность верхнего пласта достигает 15 м, нижнего – более 2 м. Исследования ледяных тел и вмещающих отложений показали, что морской этап геологического развития территории и морские отложения играют большую роль в геологическом и геокриологическом строении [Лейбман и др., 2000].

Общая схема геологического строения обнажения приведена на рис. 1. Не останавливаясь на

¹ Геологическое и геокриологическое изучение разрезов м. Шпиндлера выполнено совместно с М.О. Лейбман [Лейбман и др., 2000].

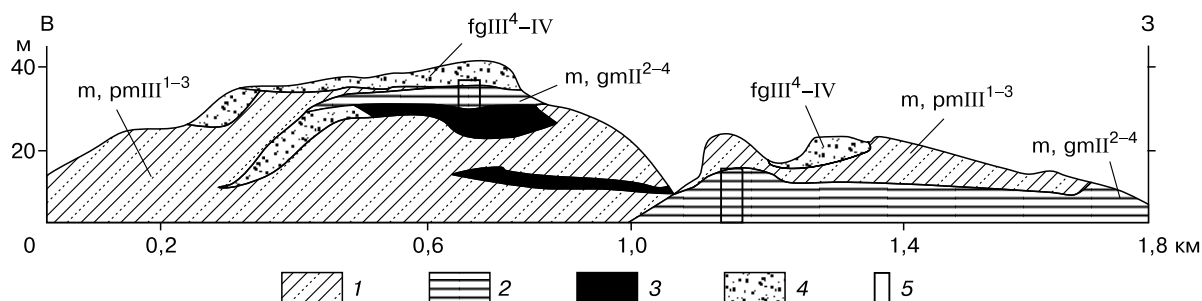


Рис. 1. Схема геологического строения и геологический возраст четвертичных отложений в районе м. Шпидлера, Югорский п-ов (по [Manley et al., 2001], с дополнениями авторов).

1 – суглинки с прослоями песков; 2 – глины; 3 – пластовый лед; 4 – пески; 5 – интервалы, из которых отобраны образцы.

особенностях геологического строения и соотношения пластовых льдов и вмещающих отложений, отметим, что в западной части разреза (см. рис. 1) в основании вскрываются эпикриогенные темно-серые (до черных) плотные глины с включениями ракушек и каменного материала. Глины обладают плохо выраженной слоистостью, в прослоях их массивная текстура. Исходя из общего геологического строения этой части Югорского п-ова, положения толщи в разрезе, внешнего облика глин, включения неразрушенных ракушек, гальки и валунов, эта толща относится к среднеплейстоценовым отложениям роговской свиты (m, gmII²⁻⁴) – аналогу сахалдинских в Западной Сибири или санчуговских отложений на Западном Таймыре. Выше лежащие эпикриогенные слоистые темно-серые суглинки и глины с прослоями супесей и тонких песков, подстилаемые толщей разнозернистых песков и залегающие с разрывом на роговских глинах, относятся к верхнеплейстоценовым. Можно не сомневаться, что черные глины над толщей пластового льда в центральной части обнажения действительно относятся к диамиктону и представляют собой изначально роговские глины, перемещенные ледником на более высокие отметки.

Полярная станция Марре-Сале. Изучение криогенного строения, состава и свойств четвертичных отложений Западного Ямала проводилось нами в 2002–2005 гг. на участке берега протяженностью около 6,5 км. Анализ литературы и собственные данные авторов об особенностях геологического и геокриологического строения позволяют считать этот разрез типичным для Западного Ямала.

В пределах этой территории выделяются третья и вторая морские террасы с береговыми обрывами высотой до 20–30 м, а также низкие участки современной лайды, примыкающие к устью р. Марре-Яха.

Схема строения четвертичных отложений в районе Марре-Сале опубликована ранее [Каневский и др., 2005], там же показано местоположение изученных нами разрезов. Современные синкрио-

генные аллювиально-морские отложения (amIV) формируются на лайде в устье р. Марре-Яха. Кроме того, современные прибрежно-морские отложения (mIV) низких затопляемых морских лайд изучены нами в районе Марресальских кошек, в 20 км к югу от п/с Марре-Сале. В высоких береговых обрывах обнажаются многолетнемерзлые четвертичные отложения, в разрезе которых мы выделяем два комплекса. Верхняя часть разреза представлена син- и эпикриогенными континентальными песчано-супесчаными верхнеплейстоцен-голоценовыми отложениями (III⁴–IV): аллювиальными, озерно-болотными, эоловыми. Ниже обычно выходят эпикриогенные морские, в разной степени засоленные, верхнеплейстоценовые (каргинские и казанцевские) глины и суглинки с прослоями песков и супесей, нередко смятые в складки (mIII¹⁻³). На отдельных участках эпикриогенно промерзшие морские отложения протаивали под озерами и вновь промерзли. На это указывают особенности криогенного строения и геохимический состав отложений. Отложения рассолены: степень засоления отложений в несколько раз ниже, а соотношение ионов характерно для изначально морского типа засоления [Каневский и др., 2005].

В ряде разрезов мощность континентальных отложений редуцирована, и морские отложения залегают практически сразу под подошвой сезонного слоя (СТС). В некоторых частях, напротив, разрез на всю высоту берегового обрыва сложен континентальными песчано-супесчаными отложениями.

Всего были изучены 23 разреза. Наиболее детально содержание органического углерода было определено по шести разрезам. Полученные данные позволяют охарактеризовать как средние содержания C_{орг} в отложениях разного генезиса, возраста и криогенной истории, так и закономерности его пространственного распределения.

На поверхности высокой лайды в настоящее время идет почвообразование и формирование торфяников. На поверхностях низкой лайды, пе-

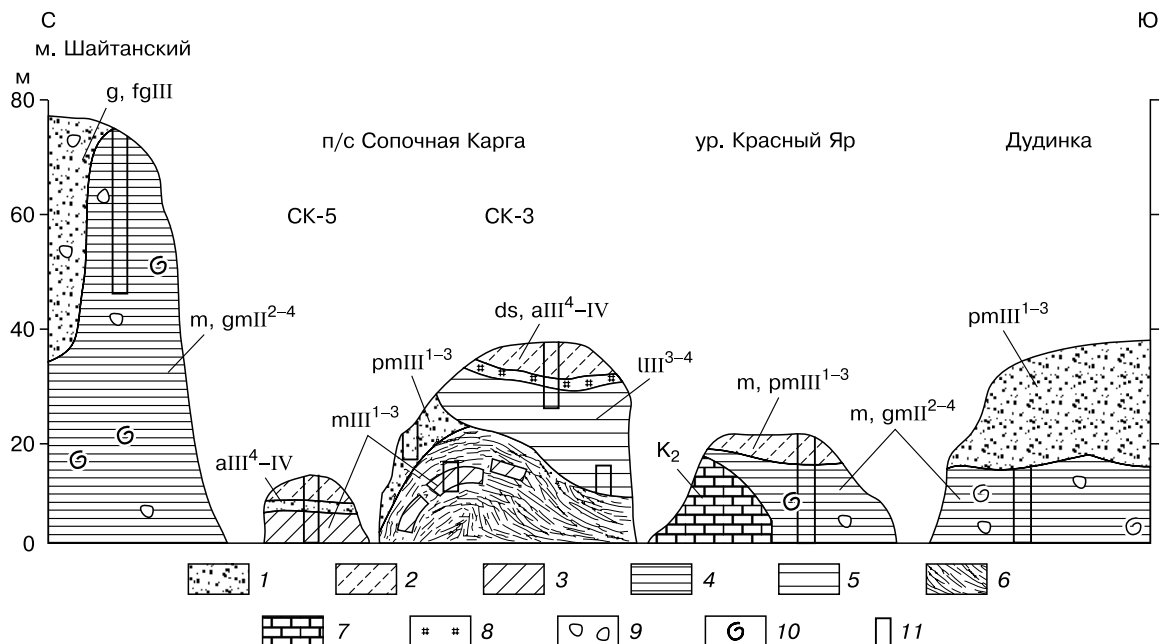


Рис. 2. Схема геологического строения и геологический возраст четвертичных отложений вдоль правого берега р. Енисей и Енисейского залива.

1 – пески; 2 – супеси; 3 – суглинки; 4 – глины; 5 – ленточные глины с тонкими прослоями песков; 6 – дислоцированное ледогрунтовое тело; 7 – известняки-ракушечники с прослоями песчаников и песков; 8 – торф; 9 – включения валунного и галечного материала; 10 – включения ракушек; 11 – интервалы, из которых отобраны образцы; СК-3, СК-5 – обнажения в районе п/с Сопочная Карга.

риодически заливаемых в нагоны и приливы, происходит накопление органического углерода в виде растительного детрита и намывного торфа.

Район г. Дудинка. В устье р. Пшеничный (3 км к северу от г. Дудинка) изучено и опробовано обнажение высотой более 30 м. Верхняя часть обнажения сложена разноразмерными песками прибрежно-морского генезиса. В нижней части вскрываются темно-серые (до черных) эпикриогенные плотные глины с плохо выраженной слоистостью мощностью более 5 м (рис. 2). Глины содержат прослой и карманы песков и обломки каменного угля. В толще глин присутствуют ракушки хорошей сохранности. По мнению С.Л. Троицкого [1966], эти глины относятся к санчуговской толще ($m, gmII^{2-4}$). Подобные толщи исследовались и описаны И.Д. Даниловым [1978a] на правобережье Енисея между г. Дудинка и пос. Усть-Порт.

Урочище Красный Яр. В геологическом отношении район урочища Красный Яр (примерно 290 км к северу от г. Дудинка) представляет собой антиклинальное поднятие, в центральной части которого обнажаются верхнемеловые известняки-ракушечники, переслаивающиеся с песчаниками, песками и алевролитами. Южное крыло поднятия до высоты 23 м сложено темно-серыми (до черных) эпикриогенными плотными глинами (см.

рис. 2), которые по своим свойствам аналогичны санчуговским глинам в обнажении р. Пшеничный. Здесь также встречаются прослой с обломками углей, включения ракушек и валунно-галечниковый материал. Исходя из геологического строения разреза, внешнего облика глин и встречающихся включений, глинистая толща нами отнесена к санчуговской ($m, gmII^{2-4}$). Верхняя часть разреза от 23 до 16,5 м над уровнем моря несет следы переработки. Породы этого горизонта обладают выраженной слоистостью и относятся к супесям. В супесях содержатся тонкие прослой тонкозернистых песков. Изменения верхней (7 м) части разреза, возможно, связаны с процессами переотложения санчуговских глин в условиях мелководья, а также с промерзанием–оттаиванием во время голоценового оптимума. Таким образом, этот горизонт является более поздним образованием и не относится к санчуговской толще.

Полярная станция Сопочная Карга. В районе п/с Сопочная Карга (300 км к северу от г. Дудинка) изучена серия разрезов верхнеплейстоценовых отложений. Территория представляет собой грядово-холмистую равнину с абсолютными отметками местности до 30–50 м.

Обнажение СК-3 расположено примерно в 0,5 км к северу от п/с Сопочная Карга. В береговом

обрыве Енисейского залива высотой около 30–35 м обнажается сложно построенный комплекс верхнеплейстоценовых отложений (см. рис. 2).

Верхняя часть разреза до глубины 5–6 м является синкриогенной и сложена преимущественно высокольдистыми однородными супесями с обилием растительных корешков и растительного детрита, включающими полигонально-жильные льды (ПЖЛ). Однородный супесчаный состав, континентальный генезис отложений, поясковая криогенная текстура, высокая (до 70 %) льдистость и наличие мощных сингенетических ПЖЛ позволяют отнести эту толщу к ледовому комплексу (ds, aIII⁴–IV).

Отложения ледового комплекса подстилаются горизонтом плохо разложившегося торфа мощностью до 1 м. Под прослоем торфа залегают светло-серые с зеленоватым оттенком ленточные глины с тонкими прослоями песков и отдельными включениями гальки и валунов. Мощность слоя ленточных глин достигает 8–10 м. Очевидно, что эта толща относится к озерным отложениям и вложена в нижележащий ледогрунтовой комплекс. По условиям криогенеза озерные отложения относятся к парасинкриогенным (по М.З. Каневскому [2004]). Вероятно, слой торфа сформировался на завершающей стадии развития древнего озера и отвечает этапу его зарастания.

В основании разреза вскрывается сложно построенная, смятая в складки ледогрунтовая толща видимой мощностью не менее 10 м. Внутри нее заключены крупные грунтовые блоки, ориентированные согласно слоистости ледогрунта. Грунтовые блоки представлены темно-серыми суглинками с включениями гальки и валунов диаметром до 40 см. В северной части обнажения (см. рис. 2) ледогрунтовая толща сложена исключительно высокольдистыми (40–50 % и выше) тонкозернистыми песками. Льдистые пески залегают над толщей, содержащей суглинистые блоки. Скорее всего, суглинистые блоки и льдистые пески относятся к морским и прибрежно-морским отложениям верхнеплейстоценового возраста.

Другое обнажение верхнеплейстоценовых суглинков СК-5 изучено нами примерно в 3 км к северу от п/с Сопочная Карга (см. рис. 2). Высота берегового термоабразионного уступа составляет 12–15 м. Верхняя часть разреза синкриогенная и сложена преимущественно слабо оторфованными супесями общей мощностью до 8 м с тонкими прослоями суглинков, которые вниз по разрезу переходят в мелко-, тонкозернистые и гравелистые пески. Здесь встречены сингенетические ПЖЛ шириной по верху до 1,5 м. Использование метода детального гранулометрического анализа позволило определить генезис песчано-алевритовой фракции в мерзлых отложениях и сделать заключение об условиях осадконакопления [Сурков, 2000]. Ус-

тановлено, что гравелистые пески представляют собой аллювиальные отложения низовьев крупной реки. Характер распределения и состав тяжелых минералов аналогичен таковым в русловой фации современного аллювия Енисея в районе г. Дудинка (в 300 км вверх по течению) и отличен от современной пляжевой фации Енисейского залива. Отложения верхних песков являются аллювиально-озерными отложениями широкой поймы. Формирование песков, вмещающих сингенетические ПЖЛ, происходило в условиях позднеплейстоценовой регрессии моря, когда морской режим осадконакопления сменился континентальным, а русло р. Енисей выдвигалось к северу более чем на 300 км [Stein et al., 2002].

Ниже песчаной пачки залегают эпикриогенные суглинистые отложения, представленные двумя горизонтами. В верхнем горизонте суглинки буровато-серые, оскольчатые, с сильным ожелезнением по граням отдельностей, размер которых колеблется от 0,3×0,5 до 1×2 см. Нижний горизонт сложен сизовато-серыми суглинками, оскольчатыми, с черными примазками. Ожелезнение по граням отдельностей с глубиной становится менее интенсивным и приурочено в основном к трещинным зонам. Гранулометрический состав глинистых отложений характеризует формирование осадка в водной среде в условиях осаждения частиц ниже уровня волновой сортировки, там, где накапливаются самые мелкие (менее 0,005 мм) частицы. Глины засолены (степень засоления до 0,5 %) и диагностируются как морские, в них встречена микрофауна и карбонатные пластинки, которые сформировались при промерзании глин. Морские осадки, слагающие нижнюю часть разреза у п/с Сопочная Карга, получили, согласно данным Н.В. Кинд, датировку по ¹⁴C в (42 000 ± 100) лет (ГИН-378) [Данилов, 19786].

Мыс Шайтанский. Обнажение на м. Шайтанский (около 340 км к северу от г. Дудинка) приурочено к высокой водораздельной поверхности холмисто-грядовой равнины. Высота берегового обрыва составляет около 80 м. В геологическом строении разреза принимают участие две разновозрастные и генетически различные толщи (см. рис. 2).

В южной части разрез представлен мощной монотонной толщей однородных плотных темно-серых суглинков с включениями валунов и гальки, обломков углей, щебня. Безусловно, эти отложения относятся к санчуговским (m, gmII²⁻⁴). В северной части в суглинистую толщу вложены сложно построенные ледниковые отложения – морены валунно-песчаного состава и песчано-глинистые флювиогляциальные отложения. По возрасту они представляют собой более молодые образования.

При проведении полевых исследований все обнажения расчищались до мерзлых пород, описывалось их геологическое строение, включая кон-

такты с подстилающими и перекрывающими толщами, определялись криогенная текстура и льдистость, проводился отбор проб для лабораторных исследований. Пробы отбирались из каждого литологического горизонта или в случае монотонного разреза – с шагом 1,5–2,0 м. Мерзлые пробы отбирались в пластиковые пакеты, чтобы исключить потери солей и органического углерода после оттаивания, и подсушивались в полевых условиях до воздушно-сухого состояния.

В лаборатории литологии и геохимии ВНИИ Океангеология во всех пробах определялся шестикомпонентный состав солей методом водной вытяжки из пород и степень их засоления, рН, гранулометрический состав с предварительной обработкой образцов ультразвуком с частотой 18 кГц для разрушения глинистых агрегатов, а также содержание органического углерода путем мокрого химического сжигания по методу Кнопа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Морские плейстоценовые отложения Западной Сибири и современные морские осадки Карского моря различного литологического состава в одних и тех же районах имеют сходные минералогические ассоциации, что свидетельствует о постоянстве питающих терригенно-минералогических провинций.

В отложениях полярных морей преобладающими глинистыми минералами являются гидрослюда и монтмориллонит с примесью хлорита и каолинита [Данилов, 1978a]. В районах, близких к областям сноса, присутствует каолинит, а в удаленных от областей сноса – монтмориллонит [Лапина, Белов, 1961]. По данным Н.Н. Лапиной [1964], основными минералами во фракции менее 0,001 мм в морских осадках Северного Ледовитого океана являются гидрослюда типа иллита, реже гидромусковит, гидробиотит, тонкодисперсный кварц с примесью бейделлита, каолинита, кальцита, доломита и органических остатков.

Известно, что среднеплейстоценовые (салехардские, роговские и санчуговские) отложения характеризуются более глинистым составом по сравнению с верхнеплейстоценовыми [Баулин и др., 1967; Полуостров Ямал..., 1975; Данилов, 1978b]. Проведенные исследования подтвердили эту закономерность. На рис. 3 приведен осредненный гранулометрический состав глинистых отложений разрезов средне- и верхнеплейстоценовых отложений. Сплошными линиями отражен состав глинистых среднеплейстоценовых пород, штриховыми – верхнеплейстоценовых. Содержание валунно-галечникового материала в анализах не учитывалось. Как видно из рисунка, среднеплейстоценовые отложения действительно характеризуются существенно более дисперсным сос-

тавом по сравнению с верхнеплейстоценовыми. И для западного (м. Шпиндлер) и для восточного (ур. Красный Яр, г. Дудинка, м. Шайтанский) секторов содержание глинистых частиц размером менее 0,005 мм в среднеплейстоценовых отложениях превышает 45 %, в то время как в верхнеплейстоценовых морских осадках их содержание не более 30 %.

Можно считать, что в тонкодисперсной составляющей пород различия в гранулометрическом составе между западным и восточным секторами Карского моря как в среднеплейстоценовых, так и в верхнеплейстоценовых отложениях сравнительно невелики. Однако это не означает, что не было различий в температурном режиме, солёности и условиях накопления органического углерода в указанных секторах.

Изучение разрезов среднеплейстоценовых отложений в западном и восточном секторах Карского моря, а также анализ литературных данных показывают, что для них не характерны включения органического углерода в виде намывного торфа, растительного детрита и т. д. В то же время лабораторные анализы показывают относительно высокое содержание $C_{орг}$ в глинистых отложениях. Органический углерод здесь содержится в других формах. Напротив, в разрезах верхнеплейстоценовых отложений, особенно в западном секторе, фиксируются прослой со сравнительно высоким содержанием растительного детрита.

Было замечено, что содержание органического углерода зависит от дисперсности отложений. Как правило, в песках содержание $C_{орг}$ всегда низ-

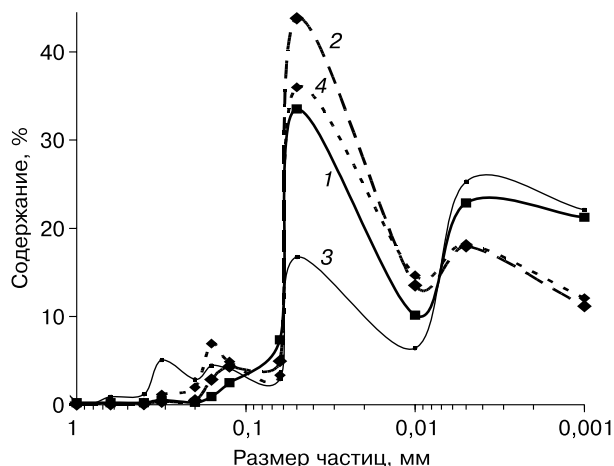


Рис. 3. Осредненный гранулометрический состав глинистых среднеплейстоценовых (сплошные линии) и верхнеплейстоценовых (штриховые линии) отложений побережья Карского моря.

1 – м. Шпиндлер; 2 – п/с Марре-Сале; 3 – Дудинка, ур. Красный Яр, м. Шайтанский; 4 – п/с Сопочная Карга (обн. СК-3, СК-5).

кое, в то время как в глинистых горизонтах оно существенно выше и увеличивается с ростом содержания глинистых частиц (размером менее 0,005 мм). Это позволяет предположить, что органический углерод в глинистых отложениях присутствует в рассеянной форме². Если это так, то его содержание зависит от удельной поверхности (содержания глинистых частиц) осадков, его концентрации в морской воде в момент осадконакопления, температуры среды и pH. Поэтому при дальнейшем анализе содержание глинистых частиц рассмотрено как показатель насыщенности отложений органическим углеродом.

Известно [Холодов и др., 2003], что в континентальных отложениях органический углерод в виде гумифицированной органики и растительного детрита является неустойчивой формой и его содержание снижается при многолетнем оттаивании. Поскольку в глинистых морских отложениях $C_{орг}$ предположительно содержится в рассеянном состоянии, можно ожидать, что эта форма является сравнительно устойчивой к изменениям внешней среды после осадконакопления, в том числе к последующим процессам протаивания. С целью проверки этого предположения были построены графики изменения содержания органического углерода по глубине для исследованных разрезов (рис. 4). Предполагалось, что наибольшие изменения содержания $C_{орг}$ вследствие процессов промерзания–оттаивания возможны в верхней части разрезов. Как видно из рис. 4, ни в среднеплейстоценовых (Красный Яр), ни в верхнеплейстоценовых (Марре-Сале) глинистых отложениях не наблюдается закономерного изменения содержания $C_{орг}$ по глубине. Более того, содержание органического углерода в парасинкриогенных отложениях [Каневский и др., 2005] (на рис. 4 отмечено окружностью) также не изменяется по сравнению с вмещающими эпикриогенными толщами. Это подтверждает наше предположение о более устойчивой (стабильной) форме присутствия $C_{орг}$ в глинистых морских отложениях.

Зависимость содержания органического углерода как функции содержания глинистых частиц представлена на рис. 5. Здесь фактические точки сравнительно хорошо ложатся на аппроксимационные кривые. Это подтверждает предположение, что $C_{орг}$ в морских отложениях содержится в адсорбционной форме. Исключение представляет разрез Марре-Сале. Здесь разброс точек вокруг кривой аппроксимации достаточно велик. Отсюда следует, что для верхнеплейстоценовых отложений в западном секторе Карского моря накопление $C_{орг}$ происходило как в адсорбированной форме, так и в форме растительного детрита, что и отме-

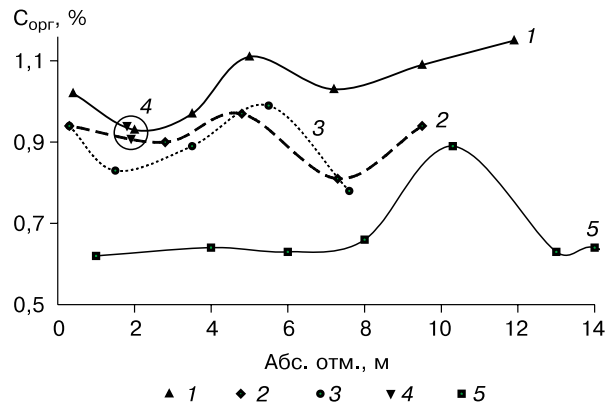


Рис. 4. Изменение содержания органического углерода в песчано-глинистых отложениях по разрезу (глубине).

1–4 – п/с Марре-Сале (1 – обн. 7/03, 2 – обн. 2/03, 3 – обн. 3/03, 4 – обн. 4/03); 5 – ур. Красный Яр.

чалось при документации разрезов. Следует заметить, что фактические точки и аппроксимационные кривые для среднеплейстоценовых отложений как западного, так и восточного секторов Карского моря достаточно близки друг к другу. В первом приближении можно считать, что условия накопления органического углерода в среднем

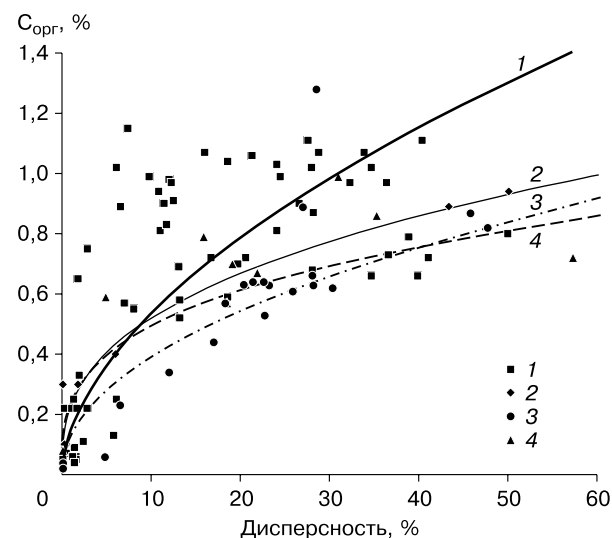


Рис. 5. Зависимость содержания органического углерода в средне- и верхнеплейстоценовых отложениях побережья Карского моря от их дисперсности.

Верхнеплейстоценовые отложения: 1 – п/с Марре-Сале, 2 – п/с Сопочная Карга; среднеплейстоценовые отложения: 3 – ур. Красный Яр, 4 – м. Шпиндлер.

² Под термином “рассеянное органическое вещество” авторы подразумевают органический углерод в соединениях, которые невозможно визуально определить в отложениях (в отличие от торфа и растительных остатков).

**Содержание органического углерода
в четвертичных отложениях
на побережье Карского моря**

| Участок | Возраст и генезис | Состав | $C_{орг}$, % | Кол-во образцов |
|--|--|---------------------|---------------|-----------------|
| м. Шпиндлер р. Пшеничный, ур. Красный Яр, м. Шайтанский | m, gmII ²⁻⁴ | Глины | 0,7 | 12 |
| | m, gmII ²⁻⁴ | Глины | 0,6 | 23 |
| п/с Марре-Сале | mIII ¹⁻³ | Суглинки, глины | 1,0 | 62 |
| п/с Сопочная Карга | mIII ¹⁻³ | Суглинки, глины | 0,8 | 14 |
| | III ³⁻⁴ | Ленточные глины | 0,7–1,5 | 3 |
| | ds, aIII ^{4-IV} (ледовый комплекс) | Супеси | 1,6–2,1 | 4 |
| п/с Марре-Сале | aIII ^{4-IV} | Пески | <0,1 | 6 |
| | amIV | Супеси, суглинки | 0,5–2,5 | 4 |
| | mIV | Пески | <0,1 | 2 |

плейстоцене были схожими в западном и восточном секторах. И наоборот, в верхнем плейстоцене наблюдаются заметные различия в содержании органического углерода в западном и восточном секторах, а следовательно, и в условиях его накопления. Таким образом, проведенное сравнение позволяет утверждать, что содержание $C_{орг}$ в глинистых морских отложениях может служить дополнительным маркером (индикатором) условий осадконакопления в Карском море в среднем и верхнем плейстоцене.

Совершенно другие закономерности характерны для накопления органического углерода в современных прибрежно-морских отложениях. В широких дельтах рек, которые часто относят к лайдам (хотя, строго говоря, они лайдами не являются), накапливаются аллювиально-морские отложения супесчано-суглинистого состава. Опробование разрезов таких отложений показало, что здесь накопление $C_{орг}$ связано с процессами почвообразования, освоением поверхности дельты растительностью и накоплением торфа. Органический углерод в отложениях дельты присутствует преимущественно в форме растительных остатков и продуктов почвообразования. Его содержание, по крайней мере до глубины 2 м от дневной поверхности, закономерно уменьшается с глубиной. В районе п/с Марре-Сале вблизи поверхности содержание $C_{орг}$ превышает 2,5 %, а на глубине 2 м составляет всего 0,5 %.

Условия накопления и трансформации органического углерода на типичных морских лайдах и ваттах пока не изучены. В песчаных отложениях – низких, затапливаемых в приливы поверхностях

содержание $C_{орг}$ составляет 0,1 %. В супесчано-суглинистых разрезах встречаются обогащенные растительным детритом прослой и горизонты, сложенные намынным торфом. Здесь активны процессы окисления и разложения растительных остатков.

Накопление органического углерода в отложениях ледового комплекса Западного Таймыра (п/с Сопочная Карга) ничем не отличается от описанного ранее для Колымы и других регионов Северо-Востока России [Губин, 2002]. Содержание $C_{орг}$ в ледовом комплексе Западного Таймыра составляет 1,6–2,1 %.

В озерных ленточных глинах содержание $C_{орг}$, как правило, достигает 0,7–1,0 %, но в отдельных случаях может превышать 1,5 %.

Обобщенные результаты оценки содержания органического углерода в четвертичных отложениях на побережье Карского моря приведены в таблице.

На основе данных о скорости термоабразии морских берегов, содержания органического углерода и растворимых солей в прибрежно-морских отложениях с использованием электронной карты берегов Карского моря [Drozdoz, Korostelev, 2003] был рассчитан годовой баланс материала. По нашим оценкам, за счет разрушения берегов ежегодно в Карское море поступает около 35 млн т вещества, в том числе: твердые осадки – 27 млн т, оттаивающий лед – 7,5, органический углерод – 0,4, растворимые соли – 0,3 млн т.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования содержания органического углерода в четвертичных отложениях на побережье Карского моря позволяют сделать следующие выводы.

1. Органический углерод в глинистых морских средне- и верхнеплейстоценовых отложениях находится предположительно в рассеянном состоянии. Его содержание пропорционально дисперсности пород (содержанию глинистых частиц).

2. В отличие от водно-растворимых солей содержание органического углерода в глинистых морских отложениях не изменяется при оттаивании в процессе криогенеза. Он является более устойчивой формой к внешним изменениям среды.

3. Условия накопления органического углерода в глинистых морских отложениях в верхнем плейстоцене были более благоприятными по сравнению со средним плейстоценом. В среднем плейстоцене условия накопления $C_{орг}$ в западном и восточном секторах Карского моря можно считать схожими. Наоборот, в верхнем плейстоцене в западном секторе условия накопления $C_{орг}$ были более благоприятными по сравнению с восточным сектором. Помимо рассеянного органического углерода в глинистых разрезах здесь также накапли-

вался C_{org} в форме растительного детрита или даже оторфованных прослоев.

4. Оценены средние содержания органического углерода в разных генетических типах отложений, широко распространенных на побережье Карского моря. Общее количество вещества, ежегодно поступающего в Карское море за счет разрушения берегов, составляет около 35 млн т, в том числе органического углерода 0,4 млн т.

5. Содержание органического углерода может служить дополнительным индикатором палеогеографических условий осадконакопления.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда "Ведущие научные школы" (лот № 2005-РИ-112.0/001/289).

Литература

- Баулин В.В., Белопухова Е.Б., Дубиков Г.И., Шмелев Л.М.** Геокриологические условия Западно-Сибирской низменности. М., Наука, 1967, 214 с.
- Васильев А.А.** Динамика морских берегов в криолитозоне западного сектора Российской Арктики (на примере Карского моря): Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Тюмень, 2004, 49 с.
- Васильев А.А.** Мониторинг морской термоабразии на Западном побережье Ямала // Тезисы Междунар. конф. "Мониторинг криосферы" (20–22 апр. 1999 г.). Пушино, 1999, с. 108–109.
- Гольдфарб Ю.И., Ежова А.Б.** Ископаемые пластовые льды на п-ове Югорском // Вопросы развития и освоения мерзлых толщ. Якутск, Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1990, с. 22–31.
- Губин С.В.** Педогенез – составная часть механизма формирования отложений позднеледникового ледового комплекса // Криосфера Земли, 2002, т. VI, № 3, с. 82–91.
- Данилов И.Д.** Полярный литогенез. М., Недра, 1978а, 238 с.
- Данилов И.Д.** Плейстоцен морских субарктических равнин. М., Изд-во МГУ, 1978б, 198 с.
- Каневский М.З.** Закономерности формирования криогенного строения четвертичных отложений северной Якутии: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2004, 21 с.
- Каневский М.З., Стрелецкая И.Д., Васильев А.А.** Закономерности формирования криогенного строения четвертичных отложений Западного Ямала (на примере района Марре-Сале) // Криосфера Земли, 2005, т. IX, № 3, с. 16–27.
- Кошелева В.А., Яшин Д.С.** Донные осадки Арктических морей России / Под ред. И.С. Грамберга. СПб., ВНИИОкеангеология, 1999, 286 с.
- Лапина Н.Н.** Вещественный состав тонкодисперсной части донных отложений Северного Ледовитого океана // Геология дна океанов и морей (Междунар. геологический конгресс, XXII сес. Докл. сов. геологов). М., Наука, 1964, с. 122–130.
- Лапина Н.Н., Белов Н.А.** Особенности процесса осадкообразования в Северном Ледовитом океане // Современные осадки морей и океанов. М., Изд-во АН СССР, 1961, с. 124–174.
- Лейбман М.О., Васильев А.А., Рогов В.В., Ингольфон О.** Исследование пластового льда Югорского полуострова кристаллографическими методами // Криосфера Земли, 2000, т. IV, № 2, с. 31–40.
- Лисицын А.П.** Маргинальный фильтр океанов // Океанология, 1994, т. 34, № 5, с. 735–747.
- Лисицын А.П.** Маргинальные фильтры Арктики // Экология северных территорий России, проблемы, прогноз ситуации, пути развития, решения: Материалы Междунар. конф. Архангельск, Ин-т экол. пробл. Севера, 2002, с. 24–27.
- Органическое** вещество донных отложений полярных зон Мирового океана / Под ред. А.И. Данюшевской. Л., Недра, 1990, 280 с.
- Петрова В.И.** Геохимия органического вещества Арктических эстуарно-шельфовых осадков: полициклические арены на разрезе река–море // Опыт системных океанологических исследований в Арктике. М., Науч. мир, 2001, с. 235–243.
- Полуостров Ямал** (инженерно-геологический очерк) / Под ред. В.Т. Трофимова. М., Изд-во МГУ, 1975, 276 с.
- Природные** условия Байдарацкой губы. Основные результаты исследований для строительства подводного перехода / Под ред. Г.И. Дубикова. М., ГЕОС, 1997, 432 с.
- Романкевич Е.А., Ветров А.А.** Цикл углерода в арктических морях России. М., Наука, 2001, 302 с.
- Сурков А.В.** Новое в изучении песчано-алевритовой компоненты россыпей и осадочных пород (Альтернативная методика). М., Издатель Е. Разумова, 2000, 286 с.
- Троицкий С.Л.** Четвертичные отложения и рельеф равнинных побережий Енисейского залива и прилегающей части Бырранга. М., Наука, 1966, 207 с.
- Холодов А.Л., Ривкина Е.М., Гиличинский Д.А. и др.** Оценка количества органического вещества, поступающего в арктический бассейн при термоабразии побережья моря Лаптевых и Восточно-Сибирского // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 3, с. 3–12.
- Brown J., Jorgenson M.T.** Carbon estimates from two Beaufort Sea key sites // Rep. on Polar and Marine Res., 2002, vol. 413, p. 25–27.
- Drozdov D.S., Korostelev Yu.V.** Environmental maps of the Russian Arctic as a base for the segmentation of the coastline and the analyses of coastal dynamics // Eighth Intern. Conf. on Permafrost (Zurich, Switzerland, 21–25 July, 2003): Abstr. Switzerland, Glaciol. and Geomorphodyn. Group Geography Depart. Univ. of Zurich, 2003, p. 27–28.
- Grigoriev M.N., Rachold V.** The degradation of coastal permafrost and the organic carbon balance of the Laptev and East Siberian Seas // Proc. of the 8th Intern. Conf. on Permafrost (Zurich, Switzerland, 21–25 July, 2003). Switzerland, A.A. Balkema Publ., 2003, vol. 1, p. 319–324.
- Manley W.F., Lokrants H., Gataullin V.N. et al.** Late Quaternary stratigraphy, Radiocarbon chronology, and Glacial history at cape Shpindler, Southern Kara Sea, Arctic Russia // Global and Planet. Change, 2001, vol. 31, p. 239–254.
- Ostroumov V., Rachold V., Vasiliev A., Sorokovikov V.** An application of a Markov-chain model of shore erosion for describing the dynamics of sediment flux // Geo-Marine Lett., 2005, vol. 25, p. 196–203.
- Rachold V., Grigoriev M.N., Are F.E. et al.** Coastal erosion vs. riverine sediment discharge in the Arctic Shelf seas // Intern. J. Earth Sci., 2000, No. 89, p. 450–460.
- Stein R., Macdonald R.W.** Organic carbon budget: Arctic Ocean vs. Global Ocean // The organic carbon cycle in the Arctic Ocean / R. Stein, R.W. Macdonald (eds.). Berlin, Springer-Verlag, 2003, p. 169–177.
- Stein R., Niessen F., Dittmers K. et al.** Siberian river run-off and Late Quaternary glaciation in the southern Kara Sea, Atlantic Ocean: preliminary results // Polar Res., 2002, vol. 21 (2), p. 315–322.

Поступила в редакцию
2 марта 2006 г.