ОКЕАНОЛОГИЯ, 2003, том 43, № 4, с. 593-604

МОРСКАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 551.465

ПОТОКИ ОСАДОЧНОГО ВЕЩЕСТВА И УГЛЕРОДА В МАРГИНАЛЬНОМ ФИЛЬТРЕ ЕНИСЕЯ И В КАРСКОМ МОРЕ

© 2003 г. А.П. Лисицын, В.М. Купцов

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Поступила в редакцию 14.11.2002 г.

По изотопу углерода ^{14}C определены скорости седиментации и возраст донных осадков Карского моря и маргинального фильтра р. Енисей. Углерод, поступающий из Енисея, имеет возрастную марку - 6.9 тыс. лет. В процессе смешения с молодым биогенным углеродом под воздействием планктона и бентоса происходит резкое снижение потока молодого углерода (планктогенного). Это было установлено при изучении органического углерода в седиментационных ловушках, расположенных на уходящих разрезах от устья реки до 76° с.ш. Главная часть $C_{орг}$ в донных осадках Карского и моря Лаптевых (70-80%) древняя (голоценовая). На долю планктогенной приходится всего 20-30%. В Центральной Арктике содержание планктогенной органики в донных осадках еще ниже, главная часть связана с поступлением древней - терригенной органики, имеющей малую пищевую ценность для организмов. На основании определения скорости седиментации и современных потоков вещества в седиментационных ловушках определено положение депоцентра осадочно-породного бассейна р. Енисей как для современного этапа, так и для геологического прошлого. Изучены закономерности изменения потоков осадочного вещества в маргинальном фильтре.

ВВЕДЕНИЕ

Маргинальный фильтр Енисея - один из самых крупных в Евразии. Устьевая область этой реки относится к эстуарно-дельтовому типу и протягивается с юга на север на расстояние около 1200 км. Дельтовая часть, отвечающая области наибольшего накопления грубого осадочного вещества реки (песчано-крупноалевритовая), имеет протяженность 230 км, а площадь дельты Енисея составляет 4500 км^2.

Енисей - самая многоводная река России - расход воды 597 км^3/год. В отличие от Оби и Лены, сток Енисея зарегулирован. Следствием этого стало снижение стока наносов более чем в 2 раза - с 13 млн т/год до 4.9 млн т/год. Соответственно снизилось и содержание взвеси со средних значений до зарегулирования 22 мг/л до 8 мг/л [*Михайлов, 1997*]. Енисей одна из самых прозрачных и слабо минерализованных рек Евразии.

Эстуарий р. Енисей, как и других великих рек Сибири, выработан во время опускания уровня во время оледенений и ранее, когда устья всех сибирских рек выходили на край шельфа. В это время Енисей и Обь имели общее устье. О древнем возрасте речных долин и изменениях уровня свидетельствует то, что древнее ложе Енисея погребено под современным на 300 м (в районе Дудинки). Дельты врезаны в древние долины и отвечают этапам подъема уровня. Соответственно с изменением уровня изменялось и положение депоцентра: при понижениях уровня он смещался к внешнему краю шельфа, а при еще большем снижении уровня, - ниже бровки шельфа, на континентальный склон.

Исследования эстуария р. Енисея в 49-м рейсе [*Лисицын и Виноградов, 1994*] охватывали область от внешнего края дельты до о. Диксон (около 800 км) и далее простирались на север до 76° с.ш. Разрез «Енисей» проходил по трассе вероятного перемещения устья и маргинального фильтра реки при снижении уровня в прошлом [*Лисицын и Виноградов, 1994*].

Соленость на поверхности на самых южных станциях разреза (4408-4409) была в пределах 0-0.05‰, т.е. отвечала речной воде, на самой северной из рассмотренных здесь станций - 23.7‰, т.е. была близка к обычной солености открытых частей Карского моря (25-31‰).

На разрезе через маргинальный фильтр Енисея в рейсе удалось выполнить полный комплекс океанологических исследований, включая определения первичной продукции, фито- и зоопланктона, детальное изучение водной взвеси и гидрооптическое зондирование, определение растворенных форм элементов [*Кравцов и др., 1994*], взвешенного и растворенного органического вещества. На этом же разрезе удалось также впервые

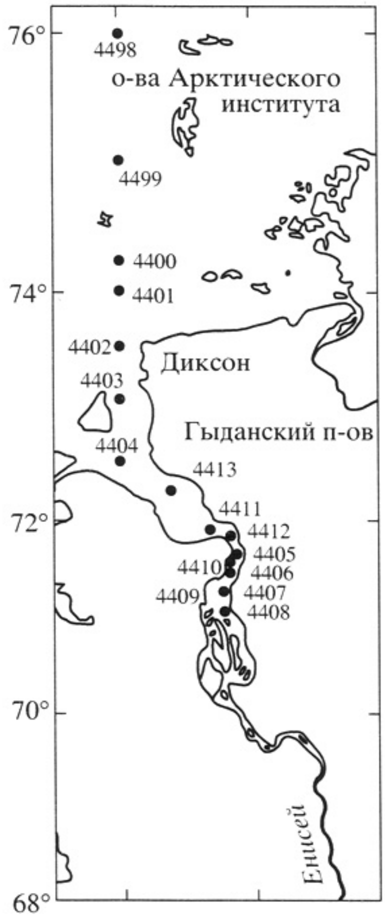

Рис. 1. Расположение станций на разрезе устье р. Енисей – Карское море (49-й рейс НИС "Дмитрий Менделеев", сентябрь–октябрь 1993 г.).

детально изучить потоки осадочного вещества и $C_{орг}$ на 6-ти буйковых станциях (всего 10 седиментационных ловушек на разных глубинах водной толщи) [*Лисицын и др., 1994*].

Также впервые в практике морских исследований на этом разрезе удалось сопоставить определения потоков осадочного вещества тремя независимыми методами: с помощью седиментационных ловушек [*Лисицын и др., 1994*], изотопным методом [*Купцов и др., 1994*] и по выходу биогенного детрита из экосистемы планктона [*Лебедева и Шушкина, 1994; Лебедева и др., 1994*].

Таким образом, был обеспечен полный океанологический и седиментационный фон для детальных исследований скоростей седиментации донных осадков в сравнении с первичной продукцией (биогенная часть потока), содержанием взвеси в речных водах в зоне смешения с прямыми определениями ее осаждения (значения вертикальных потоков по седиментационным ловушкам и двумя другими методами).

Эти исследования дополнялись изучением донных осадков на всех станциях не только из поверхностного слоя, но также и из колонок, полученных тяжелыми грунтовыми трубками.

Сопоставление полученных данных позволяет судить о скоростях осаждения осадочного материала «сегодняшнего дня» (по значениям потоков в седиментационных ловушках), скоростях седиментации в самом верхнем слое осадков (по данным из верхнего слоя дночерпательных проб и коробчатого пробоотборника ПТ) и о скоростях седиментации в геологическом прошлом (по колонкам донных осадков, полученным трубками длиной до 4 м).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В 49-м рейсе НИС «Дмитрий Менделеев» (сентябрь-октябрь 1993 г.) в устьевой зоне Енисея были проведены комплексные гидрофизические, геохимические и биологические исследования водной толщи, а также донных отложений. Исследования проводились на станциях, положение которых приведено на рис. 1. Донные отложения отбирались прямоточными ударными трубками большого диаметра (ТБД) и коробчатыми пробоотборниками (ПТ). Определения скоростей седиментации проводились по распределению ^{14}C по длине колонки. Концентрация ^{14}C определялась по бензольному варианту метода по органической компоненте осадков [*Арсланов, 1987*]. Содержание ^{14}C определяется, во-первых, биогенной (планктонной) составляющей (с небольшой поправкой на резервуарный эффект) [*Арсланов, 1987; Купцов, 1986*]. Вторая составляющая ^{14}C - терригенное вещество: с речным стоком поступает органическое вещество при размыве речных береговых четвертичных образований. Это органическое вещество уже имеет некоторое среднее значение радиоуглеродного возраста (для речного стока р. Лены этот возраст составляет 7 тыс. лет [*Kuptsov & Lisitzin, 1996*], для Оби - 8.8 тыс. лет [*Купцов и Лисицын, 2002*], Енисея 6.9 тыс. лет). Таким образом, терригенное органическое вещество древнее (7-9 тыс. лет) - это своеобразная его марка. В отличие от этого биогенное, молодое - это другая марка при изучении процессов смешения. Если концентрация ^{14}C в органическом веществе, поступающем в осадки не меняется во времени, а осадки накапливаются в определенных интервалах времени с постоянной скоростью, то изменение концентрации ^{14}C по глубине в колонках будет уменьшаться по

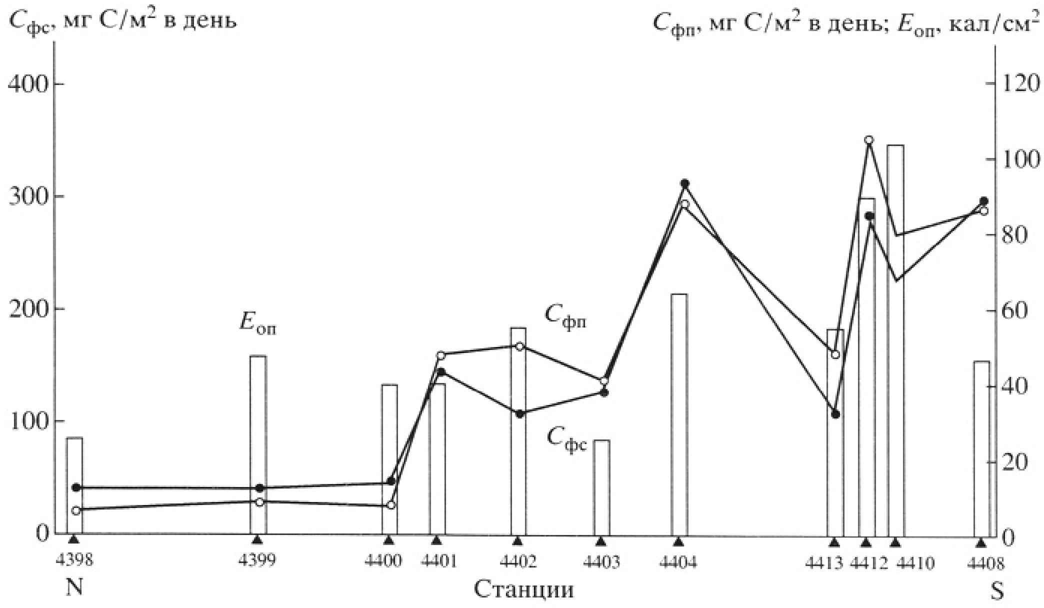

Рис. 2. Первичная продукция для верхнего слоя воды ($C_{фп}$) и для столба воды ($C_{фс}$) и суммарная падающая радиация ($E_{оп}$) на енисейском разрезе [3].

экспоненциальному закону, а значение радиоуглеродного возраста - по линейному закону.

ТЕРРИГЕННЫЕ И БИОГЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ОСАДОЧНОГО ВЕЩЕСТВА И $C_{ОРГ}$ СОВРЕМЕННЫЙ ЭТАП

В 49-м рейсе НИС «Дмитрий Менделеев» впервые для Карского моря удалось определить первичную продукцию фитопланктона не только для поверхности, что обычно делается, но для столба воды в целом, т.е. в пределах всего слоя фотосинтеза [*Ведерников и др., 1994*]. Положение нижней границы слоя фотосинтеза определяется содержанием взвеси (мутностью вод). В зоне смешения граница слоя меняется для устья Енисея от 10 м (для ст. 4410 с минимальной соленостью и максимальным содержанием взвеси) (2.4 м по диску Секки) до 30 м для крайней на севере станции 4400 (относительная прозрачность по диску Секки 10.5 м) [*Ведерников и др., 1994; Буренков и васильков. 1994*].

Первичная продукция фитопланктона в Карском море в сентябре находилась для поверхностного слоя в пределах 2.2-10.3 мгС/м^3/день, а для столба воды в пределах 25-359 мгС/м^2/день.

Наиболее продуктивными оказались воды маргинальных фильтров Оби и Енисея - продукция в столбе воды здесь в пределах 107-312 мгС/м^2/день (при обычных для открытого моря в слое фотосинтеза 31-79 мгС/м^3/день), т.е. в 3-10 раз ниже, чем в эстуарии [*Ведерников и др., 1994*].

Разрез, уходящий от устья Енисея в море с конкретными значениями первичной продукции по станциям и содержаниями хлорофилла, приведен на рисунках 2, 3. После пикового значения близ устья (вероятно локальное пятно высокой продукции) отмечается рост значений продукции, как для поверхности, так и для всего фотосинтетического слоя до ст. 4404. Далее к северу по разрезу по мере роста солености значения быстро падают, выходя на плато от ст. 4400 - около 25-50 мгС/м^2/день.

Первичная продукция определяется: 1) толщиной слоя фотосинтеза; 2) средними значениями продукции в пределах этого слоя. Величины продукции зависят от двух важнейших параметров: 1) обеспеченности светом необходимым для фотосинтеза; 2) достаточным содержанием биогенных элементов.

Толщина слоя фотосинтеза, как указывалось, определяется содержанием взвеси - терригенной в устьях рек и биогенной за их пределами. Цветение фитопланктона, снижающее прозрачность вод, приводит к снижению толщины слоя фотосинтеза, т.е. уменьшает продукцию в слое. Имеет место как бы авторегуляция цветения фитопланктона.

Важное значение для понимания процесса имеет величина *f* - отношение, показывающее долю новой продукции (РП) (выхода органического детрита или $C_{орг}$ биогенного из зоны фотосинтеза) к общей первичной

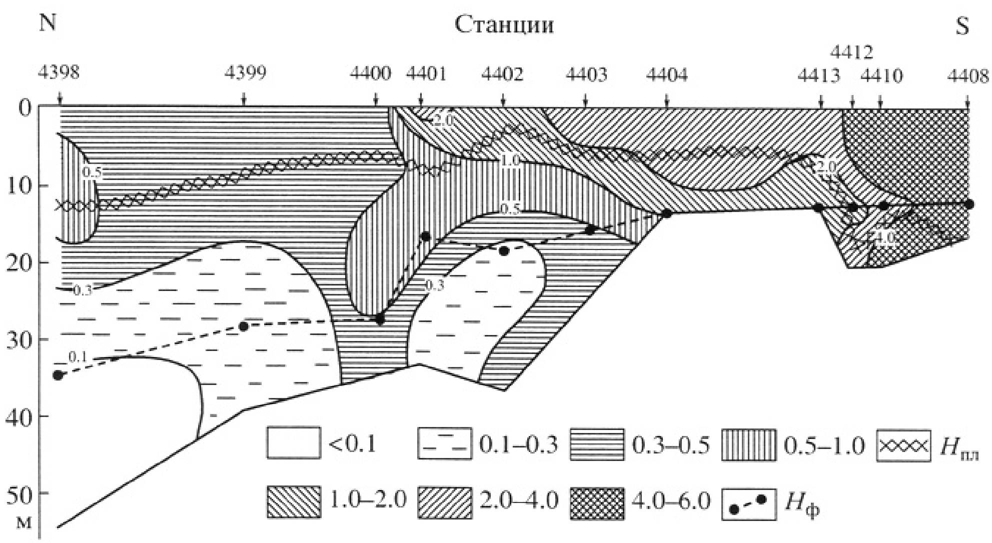

Рис. 3. Вертикальное распределение хл "а" (мг/м^3) – индикатора поступления $C_{орг}$ фитопланктона (молодое органическое вещество) на енисейском разрезе. $H_{пл}$ – пикноклин, $H_ф$ – нижняя граница слоя фотосинтеза [3].

продукции (ГШ) (определенной по ^{14}C в модификации стандартного скляночного метода) f = НП/ПП. Эта величина колеблется от максимального значения 0.12 на ст. 4403 в биологической части фильтра Енисея до средних значений 0.02-0.05 за пределами фильтра. Иными словами КПД процесса образования $C_{орг}$ биогенного в этой части фильтра максимальный.

Связь первичной продукции фитопланктона Карского моря с соленостью видна на рис. 4. Для маргинальных фильтров этого моря (в пределах солености от 0 до 20‰) характерны самые высокие первичные продукции в столбе воды, а при росте солености более 20‰ продукция в столбе воды снижается в 2 и более раз и выходит на плато при солености 25-28‰.

Максимальное поступление Сорг из слоя фотосинтеза - около 360 мгС/м^2/день соответствует солености 12‰ на ст. 4401 для Енисейского разреза. Поэтому именно здесь можно ожидать максимального поступления аутигенного (биогенного) органического углерода.

Кроме прозрачности вод, как отмечалось, продукция фитопланктона зависит и от содержания биогенных элементов. В период работ в Енисейском заливе содержания биогенов были очень низкими. Лимитирующие их значения при низких температурах арктических вод: для азота 3 мкг-ат N/л (нитраты), для фосфатов 0.5 мкг-ат Р/л, силикатов 10 мкг-ат Si/л [*Ведерников и др., 1994*].

Таким образом, в отличие от Обской губы, где высокое содержание взвеси в воде снижало толщину слоя фотосинтеза, в Енисейском заливе с его более прозрачными водами главным фактором, лимитирующим поступление биогенного $C_{орг}$ и поставки взвешенного вещества в донные осадки, является дефицит биогенов.

На пути биогенного углерода от слоя фотосинтеза к донным осадкам имеется важный барьер - фильтраторы мезопланктона. Они снижают поток $C_{орг}$ приблизительно в 2-10 раз.

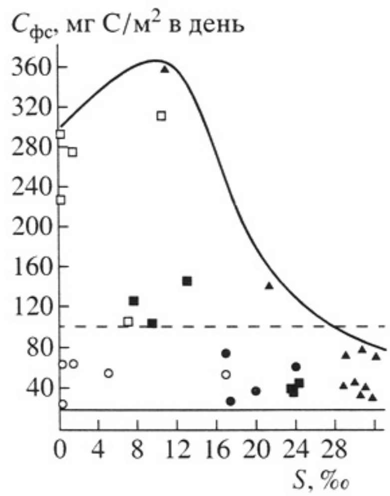

Рис. 4. Связь первичной продукции в столбе воды ($C_{фс}$) с соленостью на разрезах река–море для р. Оби и Енисея [3].

Другой потребитель органического вещества -бактерии, численность и продуктивность которых определены на разрезах методами прямого счета под микроскопом, а первичная продукция - радиоуглеродным методом. Удалось установить, что наибольшие значения численности и биомассы бактерий приурочены

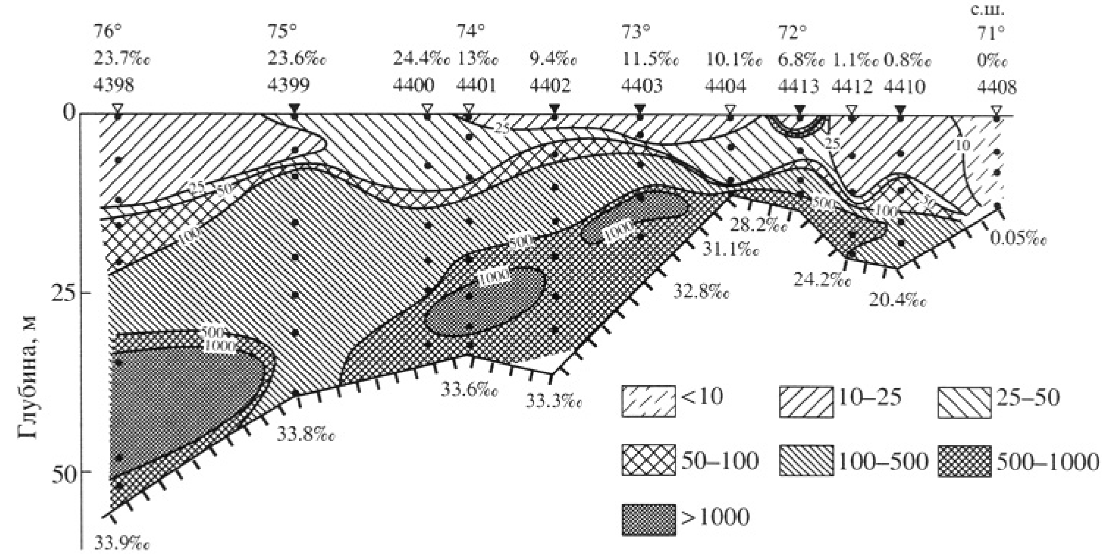

Рис. 5. Мощность биофильтрационной системы планктона (бионасос-2) на разрезе "Енисей" [4]. Биомасса мезопланктона (мг/м^3), цифры – соленость на поверхности и у дна по станциям. Осенне-зимнее состояние зоопланктона, главные концентрации – у дна (сентябрь 1993 г.).

не к открытым частям моря, а к маргинальным фильтрам Оби и Енисея. При этом в эстуарии для Оби численность бактерий в воде приблизительно на порядок выше, чем для Енисея (для Енисея 16-24 x 10^3 клеток/мл и 43-333 x 10^3 клеток/мл для Оби). Также существенно различаются и значения биомассы бактериопланктона 21-38 мгС/м^3 для Енисея против 141-464 мгС/м^3 для Оби [*Мицкевич и Намсараев, 1994*].

За пределами маргинальных фильтров этих рек содержание бактерий оказалось в Карском море по этим данным заметно ниже, чем в водах других морей Арктики. Важную роль в фильтрах играют флоккулы, образовавшиеся из коллоидной части РОВ при смешении с соленой водой-электролитом. Эти флоккулы (они изучены под микроскопом) удалось получить в достаточных количествах в материале из седиментационных ловушек. Полупрозрачные хлопья («эстуарный снег») состоят из органического вещества с включениями глинистых минералов и гидроокислов Fe. С поверхности флоккулы обычно обрастают толстым слоем бактерий и могут служить пищей для зоопланктона. Это удалось доказать прямым вскрытием желудков калянусов, которые содержали почти исключительно «морской снег». Предполагается, что это главный источник пищи зоопланктона во время продолжительной зимы, когда развитие фитопланктона прекращается [*Виноградов и др., 1994*].

Независимые доказательства важной роли потока бактериопланктона получены при прямом изучении вещества из седиментационных ловушек.

Седиментационные ловушки были парными, т.е. с двумя пластмассовыми улавливающими цилиндрами. Приемный флакон одного из них заполнялся формалином (для уничтожения бактерий), а параллельный не имел формалина, т.е. в нем поддерживались естественные для развития микробов условия среды. На глубине 100 м после экспозиции 12 суток в отравленном флаконе, где бактерии не могут размножаться, содержалось 1000 x 10^3 клеток/мл, а в фоновой воде - всего 20 x 10^3, т.е. в 50 раз меньше. Этот парадокс связан с тем, что бактерии заселяют осаждающиеся частицы и вместе с ними образуют поток $C_{орг}$ и, попадая в формалин, фиксируются - это поток бактерий с осадочным веществом за время его пребывания в воде. Во флаконе, не отравленном формалином, оказалось 5000 x 10^3 клеток бактерий, т.е. в 5 раз больше чем в отравленном, что говорит о заселении бактериями не только осаждающихся, но и осевших частиц и позволяет судить о содержании бактерий на частицах в пробе после ее улавливания ловушкой, т.е. за все время существования взвеси (время осаждения + время пребывания в ловушке).

Распределение биомассы зоопланктона (доминирующие виды фильтраторов *Calanus finmarchicus, C. glacialis*) на енисейском разрезе в 49-м рейсе показано на рис. 5. Это состояние соответствует началу зимы: фильтраторы опускаются в придонные слои, где характерны биомассы (для сентября) 500-1000 мг/м^3 при обычных содержаниях в поверхностных слоях, где развит фитопланктон, менее 50 мг/м^3. Таким образом, главное количество фильтраторов скапливается в это время во всем

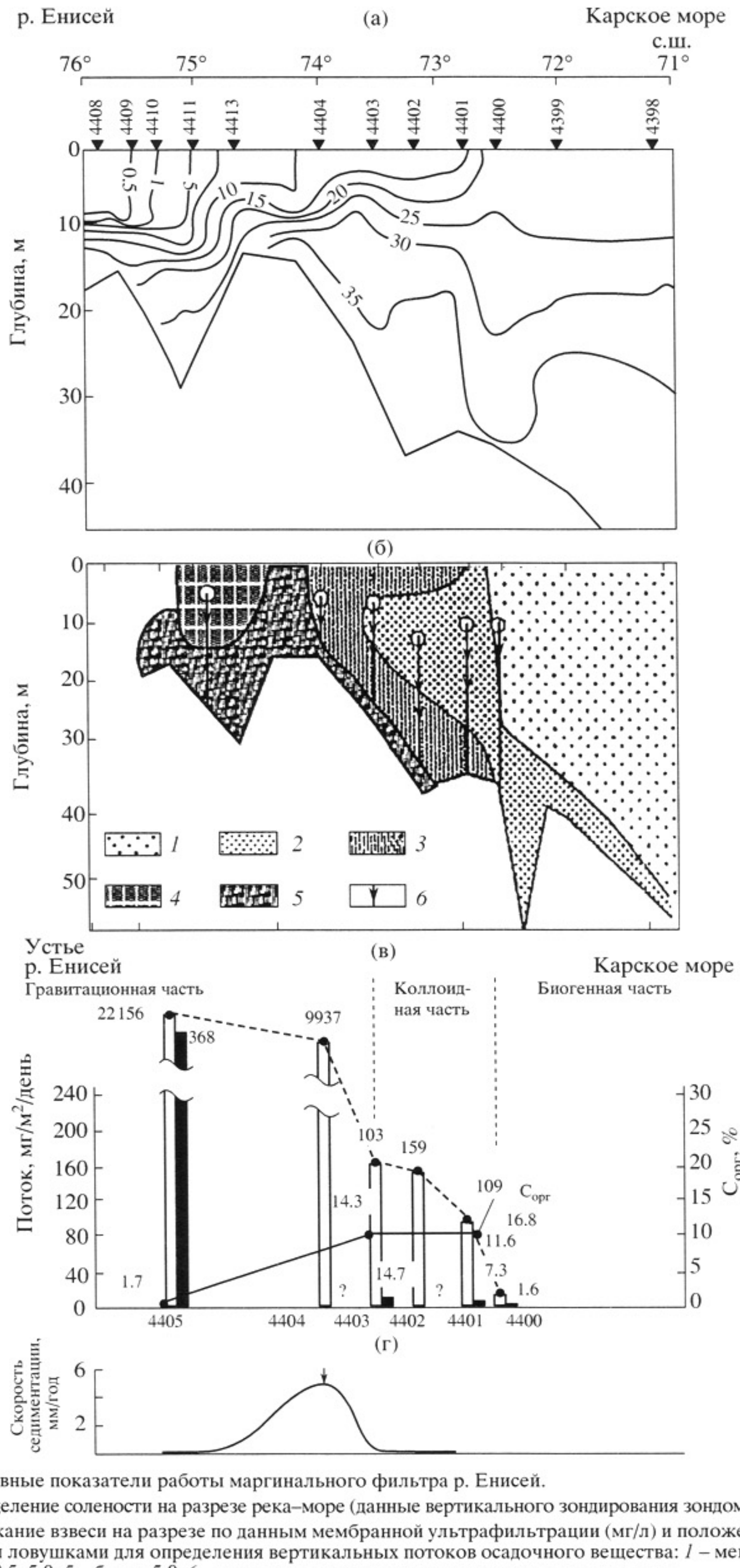

Рис. 6. Основные показатели работы маргинального фильтра р. Енисей.

(а) – Распределение солености на разрезе река–море (данные вертикального зондирования зондом Нейла–Брауна, *S*, ‰).

(б) – Содержание взвеси на разрезе по данным мембранной ультрафильтрации (мг/л) и положение станций с седиментационными ловушками для определения вертикальных потоков осадочного вещества: *1* – меньше 0.5; *2* – 0.5–1.0; *3* – 1.0–2.5; *4* – 2.5–5.0; *5* – более 5.0; *6* – горизонты установки седиментационных ловушек.

(в) – Потоки осадочного вещества и органического углерода на разрезе. Потоки осадочного вещества показаны столбцами по станциям, цифры в верхней части – фактические значения потоков (мг/м^2/сутки). Потоки $C_{орг}$ – по данным определения в материале из ловушек (столбцы с заливкой), цифры – фактические значения потоков (мгС/м^2/сутки). Кривая линия – содержание $C_{орг}$ (в %) в веществе из ловушек, шкала справа. Распределение максимальных значений потока $C_{орг}$ обратно распределению $C_{орг}$ в %. Максимальным значениям $C_{орг}$ (в %) соответствует (по возрастной метке) поступление 74% древнего (терригенного) и 24% молодого (планктогенного) углерода.

(г) – Распределение скоростей седиментации для верхнего слоя донных осадков по данным определения ^{14}C на разрезе, мм/год.

Стрелка показывает положение депоцентра.

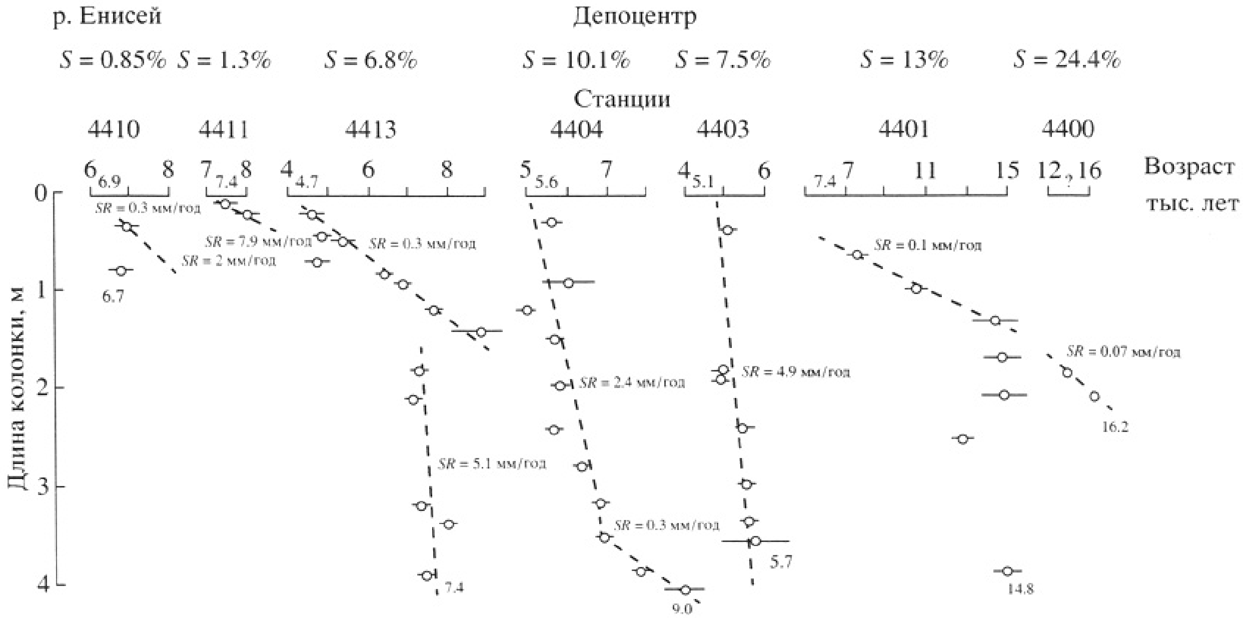

Рис. 7. Изменение скорости седиментации и "кажущегося" возраста донных осадков на разрезе река–море для р. Енисей. В устье реки возраст терригенного углерода 6.9 тыс. лет, по мере удаления от устья и смешения с молодым планктонным углеродом возраст снижается до 4.7–5.1 тыс. лет (кроме ст. 4401).
Скорости седиментации (SR) в мм/год определены для характерных отрезков колонок.
Максимальные скорости (2.4–4.9 мм/год) соответствуют положению депоцентра маргинального фильтра р. Енисей. Цифры около точек – максимальный и минимальный "кажущийся" возраст в тыс. лет.

слое фотосинтеза в глубинных слоях с высокой (морской) соленостью. В верхнем распресненном слое, мощность которого растет по мере приближения к устью Енисея, господствуют уже другие - пресноводные и солоновато-водные фильтраторы (Basmina, Daphnia, *Drepanopsis bungei* и др.), количество которых падает по мере роста солености. Биомасса зоопланктона речных вод была определена менее чем 10 мг/м^3 и нигде не превышала 20-60 мг/м^3. Такое контрастное разделение группировок и биомасс фильтраторов по вертикали приводит к тому, что в Енисейском заливе средняя для столба воды биомасса фильтраторов мезопланктона меняется очень значительно от 23 до 190 мг/м^3 [*Виноградов и др., 1994*].

Основная часть потока биогенного углерода, который выводится из продукционной зоны на дно, связана с жизнедеятельностью зоопланктона - фильтраторов, превращающих мелкие организмы фитопланктона в крупные пеллетные комки, быстро достигающие дна даже при значительных глубинах. Фильтраторы для питания используют значительную часть $C_{орг}$ фитопланктона.

Удалось определить и количественно охарактеризовать структурно-функциональные характеристики планктонных сообществ Карского моря, включая маргинальные фильтры Оби и Енисея [*Виноградов и др., 1994; Лебедева и Шушкина, 1994; Лебедева и др., 1994*].

Поток аутигенного (автохтонного, биогенного) детрита в результате жизнедеятельности зоопланктона в среднем для Карского моря равен 36 мгС/м^2/сут, т.е. эта величина даже ниже, чем в Саргассовом море [*Лебедева и Шушкина, 1994; Лебедева и др., 1994; Лисицын, 2001а*]. Реальная же продукция, т.е. выход из продукционной зоны на дно (более 200 м) оказалась равной 26 мгС/м^2/сут, т.е. 46% от измеренной первичной продукции. Эти потери связаны с питанием зоопланктона. Прямые определения потоков осадочного вещества в устье Енисея, а также определения $C_{орг}$ в веществе ловушек (рис. 6) показали, что по мере удаления от устья реки, где соленость 0% (ст. 4405), происходит быстрое убывание потока осадочного вещества - от 22156 мг/м^2/сут на ст. 4405 до 9.4 мг/м^2/сутки в конце разреза - на ст. 4400 (соленость 24.4‰). Содержание взвешенного осадочного вещества снижается здесь в сотни раз.

Содержание $C_{орг}$ во взвеси из ловушек на ст. 4405 равно 1.65% (во взвеси Обской губы значительно выше от 2.66 до 6.9%). Значение потока осадочного вещества на этой станции начинающей разрез (соленость 0‰) так велико, что даже при таком низком процентном содержании $C_{орг}$, его поток оказывается максимальным для всего разреза (368 мг/м^2/сутки).

Координаты станций, глубины моря, интервалы отбора образцов и радиоуглеродные датировки донных отложений

№ станции	Координаты		Глубина моря, м	Интервал отбора, см	Индекс датировки ИО РАН	Возраст, лет
	широта, северная	долгота, восточная				
4410	71°36.30	83°19.12	21	30–40	4293	6950 ± 270
				50–60	4296	7610 ± 200
				70–80	4297	6720 ± 310
4411	71°49.60	82°38.70	29	0–10	4302	7410 ± 200
				10–20	4303	7890 ± 260
4413	72°12.70	81°27.11	14	10–20	4253	4670 ± 170
				20–30	4254	4990 ± 200
				30–40	4255	4890 ± 150
				40–50	4256	5390 ± 180
				60–70	4258	4730 ± 350
				70–80	4259	6480 ± 190
				80–90	4260	6840 ± 160
				110–120	4271	7680 ± 310
				130–140	4272	8800 ± 750
				170–180	4247	7240 ± 280
				200–210	4263	7100 ± 140
				310–320	4267	7230 ± 180
				330–340	4268	7950 ± 180
				390–400	4270	7420 ± 200
4404	72°32.75	79°44.10	20	20–30	4283	5570 ± 200
				80–90	4285	6080 ± 650
				110–120	4246	4900 ± 100
				140–150	4261	5540 ± 160
				190–200	4264	5700 ± 140
				230–240	4265	5550 ± 140
				270–280	4266	6420 ± 180
				310–320	4269	6680 ± 100
				345–355	4273	6820 ± 110
				370–380	4274	7730 ± 100
				400–410	4257	8970 ± 660
4403	73°00.26	79°55.73	26	30–40	4272	5140 ± 210
				170–180	4275	4840 ± 160
				180–200	4276	4820 ± 110
				230–240	4277	5360 ± 150
				290–300	4278	5410 ± 180
				330–340	4279	5490 ± 150
				350–360	4280	5670 ± 830
4402	73°32.97	79°50.20	37	10–20	4295	13900 ± 1400
				150–160	4281	12120 ± 280
4401	74°00.21	79°57.13	35	50–60	4287	7380 ± 210
				90–100	4288	10610 ± 270
				120–130	4289	14360 ± 520

Таблица. Окончание

№ станции	Координаты		Глубина моря, м	Интервал отбора, см	Индекс датировки ИО РАН	Возраст, лет
	широта, северная	долгота, восточная				
4400	74°15.18	79°53.11	29	160–170	4290	14630 ± 480
				200–210	4291	14750 ± 440
				240–250	4292	12750 ± 270
				380–390	4294	14760 ± 320
				20–30	4282	=22410
				70–80	4284	=21950
				180–190	4301	13490 ± 550
				200–210	4286	16240 ± 650

Максимальное содержание $C_{орг}$ в материале из ловушек установлено на ст. 401 и 402 (это коллоидная часть фильтра) - от 11.57 до 16.81%. Поток $C_{орг}$ здесь 6.29-7.25 мг/м^2/сутки.

Таким образом, потоки $C_{орг}$ в донные осадки этого эстуария (абсолютные массы) определяются не процентным содержанием, а скоростями седиментации - значениями потоков терригенного вещества. С ростом солености поток $C_{орг}$ резко снижается (также как снижаются потоки терригенного его носителя). Распределение процентных содержаний в зависимости от солености имеет обратный ход: идет повышение $C_{орг}$ во взвеси от 1.66% в речной взвеси до 16.81 на ст. 4400 (соленость 24.4%) (см. рис. 6в).

Высокие содержания (%) $C_{орг}$ характерны также и для взвеси открытых частей Карского моря: по данным изучения материала из ловушек они обычно находятся в пределах 10-20%, на отдельных станциях достигают 22-23% [*Лисицын и др., 1994*]. Однако значения потоков $C_{орг}$ здесь по данным тех же определений в несколько раз ниже, чем в зоне эстуариев Енисея и Оби.

Возраст $C_{орг}$ донных осадков поверхностного слоя, как можно видеть из рис. 7, закономерно уменьшается по мере удаления от устья (очевидно за счет разбавления биогенным молодым материалом).

Итак, главную роль в поставке $C_{орг}$ в Карское море имеет не молодой биогенный $C_{орг}$, содержание которого - если судить по % содержаниям - довольно значительно во взвеси, а терригенный -древний, т.е. углерод принесенный реками.

Господство минерального терригенного материала в седиментационном процессе в Карском море дополняется, таким образом, господством терригенного $C_{орг}$. Это подтверждается и распределением значений возраста $C_{орг}$ в поверхностном слое осадков всех морей Арктики - преобладает древний, т.е. терригенный углерод [*Купцов и Лисицын, 2002; Kuptsov & Lisitsin, 1996*]. Этот вывод частично подтверждается и рядом независимых методов: изучением органического вещества под микроскопом, C/N отношением, изотопным составом, содержанием лигнина и других биомаркеров [*Романкевич и Ветров, 2001*].

Таким образом, и на современном этапе, и (судя по нашим данным) в геологическом прошлом судьбы $C_{орг}$ в донных осадках Арктики определялись терригенным веществом, его потоками из водосборов.

При оценке потоков $C_{орг}$ на современном этапе имеет место существенный пробел в наших знаниях. Данные о современных потоках определены только для одного сезона - летней межени - начала осени (сентябрь-октябрь). Главная же часть терригенного вещества и $C_{терриген}$ поступает во время паводка (июнь), а $C_{биоген}$ во время цветения фитопланктона (июль) [*Лисицын, 1994; 2001; Романкевич и Ветров, 2001; Lukashin et al., 1999*].

Частично этот пробел может быть восполнен косвенным методом - по среднегодовым значениям солености и коэффициентом ее вариации на протяжении года. Коэффициенты вариации зависят от разбавления пресными водами - они выше всего (более 0.4) в устьях и по мере удаления от устья снижаются до 0.25. Максимальное распространение паводковых вод (по коэфф. вариации 0.25) охватывает почти всю восточную часть моря. Это подтверждается и многолетними измерениями температуры поверхностных вод. Речные воды имеют температуру 9-10°C, морские от 3 до менее 2°C.

Эти данные гидрофизики позволяют в самом первом приближении судить о границах маргинального фильтра Оби и Енисея в многолетнем плане. Они могут быть проверены прямыми определениями скоростей седиментации.

Ранее такие данные о скоростях седиментации и физических свойствах донных осадков (необходимых для перехода к определению палеопотоков осадочного вещества) были приведены для устья р. Лены, а также р. Оби [*Лисицын, 1988; 2001; Kuptsov & Lisitsin, 1996*].

СКОРОСТИ СЕДИМЕНТАЦИИ И ИСТОЧНИКИ $C_{ОРГ}$ В ГЕОЛОГИЧЕСКОМ ПРОШЛОМ

Используя возрастную метку, можно не только определять скорости седиментации для разных этапов прошлого, но и на основе данных об объемном весе и влажности - судить об изменениях потоков (мг/см^2/год) терригенного вещества (и терригенного $C_{орг}$) в прошлом - сотни-тысячи лет назад.

Результаты определения скорости седиментации и радиоуглеродного датирования приведены в таблице, а распределение полученных значений радиоуглеродного возраста по горизонтам колонок осадков - на рис. 7. Распределение радиоуглеродных датировок аппроксимировалось уравнением регрессии, по которому рассчитывались средние скорости седиментации и значение радиоуглеродного возраста поверхностного слоя осадков. По средним значениям скоростей седиментации рассчитывался возраст основания колонки или отдельных ее фрагментов.

Рассматриваемый широтный разрез - зона смешения речных и морских вод, в которой развиваются процессы соленостной флоккуляции и биоседиментации. Положение депоцентра отчетливо фиксируется по высокой величине ~5 мм/год (или 5000B, где B - международная единица скорости седиментации Бубнова, 1 B = 1 мм/1000 лет), скорости накопления осадков в районе ст. 4403, вне пределов этой области они снижаются в 20-50 раз. На станциях, расположенных на шельфе, скорости седиментации снижаются до величин ~0.1 мм/год (станции 4400 и 4401) или осадки местами практически отсутствуют (станции 4498 и 4499). Резкое изменение скорости седиментации на ст. 4413 с величины 0.3 до 5.1 мм/год связано с поднятием уровня вод Мирового океана и смещением области смешения вод в южном направлении. Изменение скорости седиментации на ст. 4404, по-видимому, вызвано резким изменением уровня океана около 2 тыс. лет назад.

В пределах рассматриваемого разреза концентрация взвешенного вещества речного стока не превышает 8 мг/л, и взвешенное вещество представлено в основном тонкой фракцией.

Величина первичной продукции в южной части разреза достаточно высока, на нескольких станциях она достигает величины - 300 мгС/м^2/день. Положение депоцентра и области максимальной концентрации взвешенного вещества и первичной продукции значительно разобщены в пространстве. Это связано с тем обстоятельством, что наши исследования проводились осенью (в межень), когда оба эти параметра минимальны, а положение депоцентра, несомненно, соответствует периоду максимальной концентрации взвешенного вещества в речном стоке, т.е. весной (в пик паводка), когда зона смешения речных и морских вод смещена в северном направлении (положение депо-центра).

Среднее значение радиоуглеродного возраста нулевого горизонта на станциях 4413,4404,4403 и 4401 составляет 4.6 тыс. лет. По простым пропорциям смешения можно легко подсчитать, что 24% органического углерода поступает в донные отложения из фотического слоя.

Из рассмотрения таблицы и рис. 7 следует несколько выводов.

1. Возраст органического вещества р. Енисей (соленость 0 ‰) 6.9 тыс. лет, что близко к возрасту органического вещества в устьях р. Лены (около 7 тыс. лет) и р. Оби (9.4 тыс. лет).

2. По мере удаления от устья и добавления молодого биогенного вещества планктона идет в общем снижение возраста органики от исходного 6.9 тыс. лет до 5.6-4.7 тыс. лет с отклонениями, связанными, по-видимому, с поступлением органики из местных источников (мелкие притоки, участки размыва и др.).

3. По вертикали выделяются участки, где значения возрастов укладываются в одну линию. Ее наклон соответствует скорости седиментации; в других случаях выделяются резкие изломы, связанные с изменениями скоростей седиментации в геологическом прошлом (станции 4413 и 4404). Особенно резкие изменения скорости отмечаются на ст. 4413 (всего 0.3 мм/год для верхних слоев колонки до гор. 110-120 см). Ниже этого слоя скорость вплоть до низа колонки (400-410 см) возрастает в 17 раз и выдерживается достаточно устойчиво.

4. Для заключительного этапа развития маргинального фильтра скорости менялись в широких пределах - от 0.1 до 4.9 мм/год, что соответствует 100-4900 B (мм/тыс. лет), т.е. скорости и в прошлом сохранялись лавинными.

Распределение скоростей в маргинальном фильтре в общих чертах близко к распределению современных потоков, измеренных на этом разрезе седиментационными ловушками. По данным ловушек депоцентр сегодняшнего дня находится в районе ст. 4405, к сожалению, определений возраста здесь не удалось выполнить. Очень высокие значения потоков на соседних станциях 4403 и 4404. Полного совпадения скоростей седиментации и современных потоков нет, что и естественно, если учесть что данные по потокам охватывают всего 1.5 мес. - осеннее состояние эстуария.

5. Депоцентр со скоростями седиментации 4.9 мм/год располагается, как следует из рис. 7, на ст. 4403, а по потокам (рис. 6) на соседней ст. 4405.

6. В нижних слоях колонок максимальная скорость седиментации для длительного отрезка времени достигала 5.1 мм/год. При этом депоцентр перемещался от своего современного положения на ст. 4403 ближе к устью (к ст. 4413). В древних частях маргинального фильтра р. Обь скорости не возрастали более 1.3 мм/год, но и в этом случае отмечается смещение древнего депоцентра ближе к устью реки.

Таким образом, основные закономерности работы маргинального фильтра р. Енисей сохранялись во времени, хотя отдельные его части смещались в соответствии с изменениями уровня моря. Особенно четко это видно по изменению положения депоцентра. Существующее в современных осадках преобладание древнего (терригенного) $C_{орг}$ сохранялось на протяжении голоцена, т.е. это явление достаточно древнее.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Органический углерод, поставляемый из огромных водосборов Великих рек Сибири (Лена, Енисей, Обь) помечен возрастной меткой, которая отличается от метки биогенного органического углерода, продуцируемого современным планктоном.

2. Возраст $C_{терриген}$, как показывают анализы верхнего слоя донных осадков в устьях этих рек, а также в их маргинальных фильтрах р. Лена около 7 тыс. лет, Енисей 6.9 тыс. лет, Обь 8.8 тыс. лет, т.е. это возраст не современный, а возраст органического вещества голоцена, бореально-атлантического времени.

3. Органический углерод в донных осадках включает две компоненты: 1 - терригенный, встречающийся как в маргинальных фильтрах, так и в осадках Карского и моря Лаптевых - наиболее стойкий. 2 - биогенный (планктоногенный), нестойкий в толще вод и в донных осадках. Именно он наиболее полно используется в процессах диагенеза и для питания бентоса.

4. На конкретных станциях, в каждом отдельном случае на основании знания «кажущегося» возраста по ^{14}C и возрастных меток терригенной и биогенной составляющей можно определить конкретно вклад этих двух видов $C_{орг}$ в седиментацию (по законам смешения).

5. Цифры «кажущихся» возрастов при анализе колонок осадков обычно для определенных отрезков времени укладываются в линии, близкие к прямой. По наклону этой линии определяют средние значения скорости седиментации, а далее - календарного возраста для всех горизонтов этого участка. Изломы линий отвечают изменениям условий седиментации, что подтверждается и полученными для этих отрезков значениями скоростей осадкообразования.

6. Таким образом, значения возраста позволяют судить о генезисе $C_{орг}$, вкладе в его формирование различных источников (главные - растительное вещество суши и морской планктон).

Общий вывод из проделанной работы: углерод в донных осадках морей Арктики - не морской биогенный (планктоногенный), а терригенный, т.е. поступивший с суши, причем не современный, а древний - по крайней мере для последних 10 тыс. лет. Эти два вида $C_{орг}$ различаются по составу и свойствам (реакционной способности, стойкости к разложениям и др.). При геохимических исследованиях следует учитывать соотношение этих двух генетических типов $C_{орг}$ раздельно.

В толще морских вод безусловное господство планктоногенного вещества в поверхностных водах сменяется господством терригенного в придонных слоях вод и в донных осадках. Биогенная компонента избирательно потребляется (микроорганизмы, зоопланктон), быстро окисляется, расходуется в ходе диагенеза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Арсланов Х.А.* Радиоуглерод: геохимия и геохронология. Л.: Изд. ЛГУ. 1987. 298 с.

2. *Буренков В.И., Васильков А.П.* О влиянии материкового стока на пространственное распределение гидрологических характеристик вод Карского моря // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 652-662.

3. *Ведерников В.И.. Демидов А.П., Судьбин А.И.* Первичная продукция и хлорофилл в Карском море в сентябре 1993 г. // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 693-704.

4. *Виноградов М.Е., Шушкина Э.А., Лебедева Л.П., Гагарин В.И.* Мезопланктон восточной части Карского моря и эстуариев Оби и Енисея // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 716-723.

5. *Кравцов В.А., Гордеев В.В., Пашкина В.И.* Растворенные формы тяжелых металлов в водах Карского моря // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 673-681.

6. *Купцов В.М.* Абсолютная геохронология донных осадков морей и океанов. М.: Наука, 1986. 271 с.

7. *Купцов В.М., Лисицын А.П.* Голоценовое осадконакопление в Обской губе и прилегающем шельфе // Океанология. 2002. Т. 42. № 6. С. 883-901.

8. *Купцов В.М., Лисицын А.П., Шевченко В.П.* ^{234}Th как индикатор потоков взвешенного вещества в Карском море // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 759-766.

9. *Лебедева Л.П., Шушкина Э.А.* Оценка потока автохтонного детрита через планктонные сообщества Карского моря // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 730-735.

10. *Лебедева Л.П., Шушкина Э.А., Виноградов М.Е.* Динамическая модель пелагической экосистемы Карского моря // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 724-730.

11. *Лисицын А.П.* Лавинная седиментация и перерывы в осадконакоплении в морях и океанах. М.: Наука, 1988. 308 с.

12. *Лисицын А.П.* Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735-748.

13. *Лисицын А.П.* Литология литосферных плит // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 4. С. 522-559.

14. *Лисицын А.П.* Потоки вещества и энергии во внешних и внутренних сферах Земли // Глобальные изменения природной среды. Новосибирск: Наука, 2001. С. 163-248.

15. *Лисицын А.П., Виноградов М.Е.* Международная высокоширотная экспедиция в Карское море (49-й рейс Научно-исследовательского судна «Дмитрий Менделеев») // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 643-652.

16. *Лисицын А.П., Шевченко В.П., Виноградов М.Е. и др.* Потоки осадочного вещества в Карском море и в эстуариях Оби и Енисея // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 748-759.

17. *Михайлов В.Н.* Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: Геос, 1997.413 с.

18. *Мицкевич И.Н., Намсараев Б.Б.* Численность и распределение бактериопланктона в Карском море в сентябре 1993 г. // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 704-709.

19. *Романкевич Е.А., Ветров А.А.* Цикл углерода в арктических морях России. М.: Наука, 2001. 301 с.

20. *Kuptsov V.M., Lisitzin A.P.* Radiocarbon of Quaternary along shore and bottom deposits of the Lena and the Laptev Sea sediments // Marine Chemistry. 1996. V. 53. P. 693-703.

21. *Lukashin V.N., Ljutsarev S.V., Krasnyuk A.D. et al.* Suspended particulate matter in the Ob and Yenisei estuaries // Berihte Polarforschung. 1999. V. 300. P. 155-178.

Recent and Ancient Sedimentary Matter and Carbon Fluxes in the Yenisei Marginal Filter and in the Kara Sea

A.P. Lisitzin, V.M. Kuptsov

Sedimentation rates and bottom sediment ages were determined by ^{14}C method in the Kara Sea and the Yenisei river marginal filter. The age of carbon supplied by the Yenisei is estimated at 6.9 thousand years. As the supplied carbon mixes with young biogenous carbon under the influence of plankton and benthos a young carbon flux (planktonogenic) sharply diminishes. This has been infered from the studies of organic matter in sedimentary traps deployed along sections from the river mouth to 76° N latitude. The major part (70-80%) of C_{org} in bottom sediments of the Kara and Laptev seas is ancient (Holocene). The planktonogenic part comprises only 20-30%. In the Central Arctic basin the percentage of planktonogenic organic matter in bottom sediments is still lower, the major part being associated with the supply of ancient terrigenous organic material of low nutritional value for organisms. The determinations of sedimentation rates and recent matter fluxes from sedimentary traps served as a basis for locating a sedimentary depocentre in the Yenisei river both for the present time and for the geological past. Regularities of variations of sedimentary matter fluxes in the marginal filter were studied.

Ссылка на статью:

Лисицын А.П., Купцов В.М. **Потоки осадочного вещества и углерода в маргинальном фильтре Енисея и в Карском море** // Океанология. 2003. Т. 43. № 4. С. 593-604.