

ГЕОХИМИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЦЕНТРАЛЬНО-АРКТИЧЕСКИХ ПОДНЯТИЙ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА

В.И. Петрова, Г.И. Батова, А.В. Куршева, И.В. Литвиненко

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

На основе геоморфологической, литологической и фациальной характеристик Восточно-Арктической континентальной окраины исследовались основные факторы, контролирующие поступление в позднем кайнозое органической составляющей в донные отложения провинции Центрально-Арктических поднятий Северного Ледовитого океана. Комплексный анализ рассеянного органического вещества (РОВ) образцов, отобранных в ходе научно-исследовательских рейсов НЭС «Академик Федоров» (Арктика-2000 и Арктика-2005), показал существенные различия осадочных отложений хр. Ломоносова и поднятия Менделеева. Так, донные осадки последнего отличаются высоким уровнем преобразования и отсутствием терригенных компонентов, на что указывает специфика основных геохимических характеристик (C_{org} , C_{carb} , N_{org} , битумоидов, гуминовых кислот), а также состав и распределение углеводородных молекулярных маркеров (алканов, насыщенных и ароматических цикланов). Комплекс полученных данных позволяет сделать вывод, что в формировании плейстоцен-голоценовых отложений осевой части поднятия Менделеева значительную роль играют древние осадочные породы, содержащие генетически однородное и глубоко преобразованное ОВ, достигшее уровня мезокатагенеза.

Донные отложения, геохимия, рассеянное органическое вещество, углеводородные молекулярные маркеры, Арктика, Северный Ледовитый океан.

GEOCHEMISTRY OF ORGANIC MATTER OF BOTTOM SEDIMENTS IN THE RISES OF THE CENTRAL ARCTIC OCEAN

V.I. Petrova, G.I. Batova, A.V. Kursheva, and I.V. Litvinenko

Based on geomorphological, lithological, and facies characteristics of the East Arctic continental margin, we studied the main factors controlling the Late Cenozoic supply of organic matter (OM) to the bottom sediments of the rises of the central Arctic Ocean. Complex analysis of dispersed OM in the samples taken during the expeditions of the R/V Akademik Fedorov in 2000 and 2005 showed a significant difference between the sediments of the Lomonosov Ridge and Mendeleev Rise. The bottom sediments of the latter are strongly transformed and lack terrigenous components, as evidenced from the main geochemical characteristics (contents of C_{org} , C_{carb} , N_{org} , bitumens, and humic acids) and the composition and distribution of hydrocarbon molecular markers (alkanes, saturated and aromatic cyclanes). The obtained data evidence that ancient sedimentary rocks containing genetically uniform deeply transformed (up to mesocatagenesis) OM played a significant role in the formation of the Pleistocene-Holocene sediments of the axial part of the Mendeleev Rise.

Bottom sediments, geochemistry, dispersed organic matter, hydrocarbon molecular markers, Arctic, Arctic Ocean

ВВЕДЕНИЕ

Изучение рассеянного органического вещества (РОВ) донных отложений и осадочных пород, одного из основных компонентов биогеохимической системы Мирового океана, способствует пониманию долгопериодных (до 10^8 лет) изменений в глобальном цикле углерода, устанавливая смену биогенных предшественников исходного органического материала и/или свидетельствуя о климатических изменениях, а также дает представление о трендах эволюции древних осадочных толщ [Вернадский, 1940; Eglinton, Murphy, 1969; Конторович и др., 1971; Романкевич, 1977; Brassell et al., 1987; Saliot et al., 1992; Knies et al., 2000].

Являясь неотъемлемой частью суммарного седиментационного потока, РОВ образует с минеральной матрицей прочные комплексы на основе химических и сорбционных связей. Экспериментально установлено, что РОВ, устойчивое *in situ* в геологическом времени, после десорбции полностью минерализуется аэробными бактериями в течение 5 дней [Keil et al., 1994]. В то же время прочно связанное с минеральными частицами РОВ проходит с ними весь путь от зоны иммобилизации до бассейна конечной седиментации, кодируя в своей молекулярной структуре геологическую судьбу осадочного материала.

Глубоководная часть Северного Ледовитого океана (СЛО) как конечный бассейн седиментации содержит в своих отложениях стратифицированную последовательность вариаций потоков осадочного вещества, обусловленных, в частности, кайнозойскими климатическими изменениями [Schubert, Stein, 1996; Cranston, 1997; Kassens et al., 1999; Belicka et al., 2002; Лисицын, 2004; Weller, Stein, 2008]. Соответственно, СЛО является ключевым регионом для понимания путей образования осадочного чехла прилегающего к нему арктического шельфа. С другой стороны, сравнительное изучение донных отложений Евразийской и Амеразийской континентальных окраин позволяет оценить вклад различных источников осадочного материала (речной сток, турбидитные потоки, океанские вдольсклоновые течения, субаквальный размыв и переотложение коренных пород) в формирование современного осадочного чехла СЛО.

Необходимым звеном исследований в данном направлении является изучение компонентов РОВ, маркирующих различные потоки осадочного материала и отражающих смену условий осадконакопления [Романкевич, 1977; Романкевич и др., 1982; Данюшевская и др., 1990; Stein, Macdonald, 2004]. Базовыми геохимическими параметрами для этих целей служат элементный ($C_{\text{орг}}$, $C_{\text{карб}}$, $N_{\text{орг}}$) и групповой составы РОВ. Еще более углубленную геохимическую информацию дает изучение РОВ на уровне молекулярных структур [Salot et al., 1992; Peters, Moldowan, 1994; Peulve et al., 1996; Беляева, 2004; Petrova et al., 2004; Weller, Stein, 2008]. Вариации состава молекулярных маркеров в стратиграфическом разрезе позволяют судить об интенсивности и направленности трансформации РОВ в диагенезе. Наряду с этим «молекулярная стратиграфия» наглядно отражает изменение источников, путей поступления и условий седиментации осадочного материала [Stojanovic et al., 2001; Duan, Ma, 2001; Hautevelle et al., 2006].

В качестве специфических «хемофоссилий» могут выступать алифатические углеводороды алканового ряда, а также реликтовые биомаркеры циклического строения (стераны, гопаны, ароматические цикланы), наследующие углеводородный скелет биогенных предшественников и, как следствие, дающие информацию для генетических и литолого-фациальных палеорекопструкций [Eglinton, Murphy, 1969; Venkatesan, Kaplan, 1982; Петров, 1984; Brassel et al., 1987; Yunker et al., 1993; Hedges, Prahl, 1993; Peters, Moldowan, 1994; Bastow et al., 2001; Чахмахчев, Виноградова, 2003; Hautevelle et al., 2006; Greenwood et al., 2006].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом данного исследования являлись осадочные отложения, отобранные на меридиональном профиле вдоль поднятия Менделеева (НЭС «Академик Федоров», 2000, 2005 гг.), от континентального склона до 82° с.ш. (рис. 1, профиль 1). В качестве объекта сопоставления привлечены образцы, взятые на профиле северная часть шельфа моря Лаптевых—котловина Амундсена—центральная часть СЛО (см. рис. 1, профиль 2).

Образцы донных осадков отбирали из ударных трубок (до 6 м) с пластиковыми вкладышами в стерильную тару и сохраняли при $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Аналитическая процедура изучения РОВ включала: определение элементного состава ($C_{\text{орг}}$, $C_{\text{карб}}$, $N_{\text{орг}}$), экстракцию битумоидов, определение их группового состава, хроматографическое выделение фракций насыщенных и ароматических УВ с последующим их исследованием методом ГХ-МС на комплексе Hewlett Packard 5973/6850 с квадрупольным масс-детектором и программным пакетом обработки аналитической информации. Для анализа насыщенных и циклических УВ использовалась капиллярная колонка HP DB 30 м \times 0.25 мм с неподвижной фазой 5 % фенил – 95 % метилсиликон. Газ-носитель — гелий, скорость потока 1.2 мл/мин, температура инжектора 320 °С, температурный режим анализа: от 50 до 320 °С по 3 °С/мин и 7 мин при 320 °С. Детектирование проходило по полному ионному току (SCAN от 50 до 500 m/z , 70 эВ), интерпретация масс-хроматограмм по характерным ионам m/z 71, 191, 217, 218. Анализ фракции ароматических УВ проводили на той же колонке; газ-носитель — гелий, скорость потока 1.2 мл/мин; температура инжектора 290 °С. Температурный режим анализа: от 60 до 200 °С по 20 °С/мин, до 300 °С по 10 °С и 5 мин при 300 °С. Детектирование происходило по полному ионному току (SCAN от 50 до 500 m/z , 70 эВ). Голоядерные полиароматические УВ исследовали по селективным ионам m/z 128, 152, 154, 178, 192, 202, 206, 228, 252, 276, 278. Алкилированные полиароматические УВ анализировали по селективным ионам m/z 183, 192, 206, 219, 220, 216, 242. Идентификация индивидуальных соединений осуществлялась по времени удерживания и масс-спектрам путем сравнения со стандартами (Supelco 47930-U и 46955-U), а также опубликованными данными.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Профиль 1 берет начало на границе континентальный шельф—терраса Кучерова и проходит вдоль основной гряды поднятия Менделеева (см. рис. 1), которую в геоморфологическом отношении в целом можно подразделить на систему погружающихся ступеней [Нарышкин, 1995; Кабаньков и др., 2004а,б, 2008]. Гранулометрический анализ показал, что в осадках преобладают пелиты и алевролитистые пелиты, наряду с ними присутствуют пески и гравелиты, наиболее выраженные в отложениях северной части

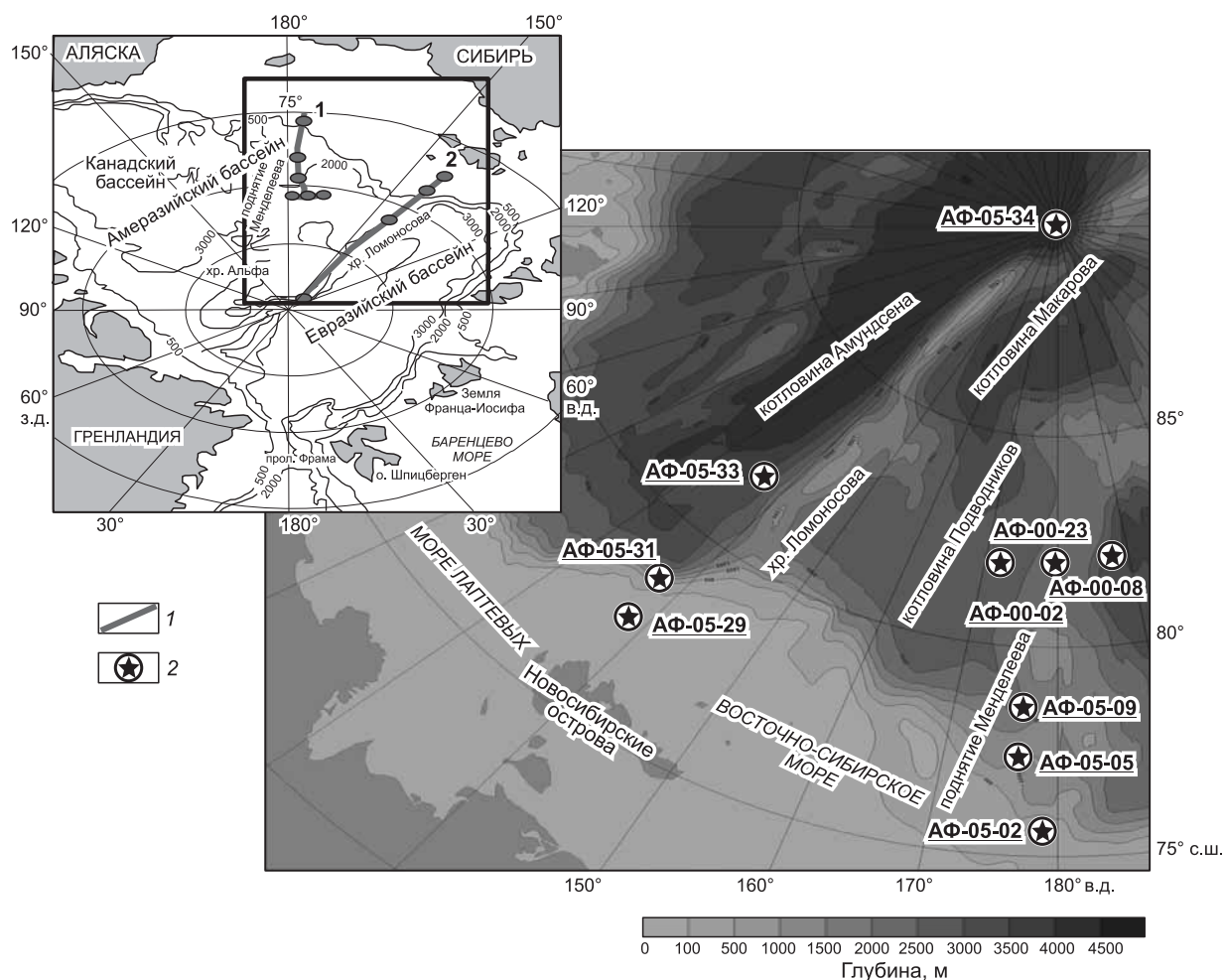


Рис. 1. Карта района исследований.

1 — районы исследования: 1 — профиль 1, 2 — профиль 2; 2 — станции пробоотбора.

меридионального разреза (станции АФ-05-09, АФ-00-08). Литологические исследования и изучение литодинамических процессов позволяют предположить, что формирование осадочных отложений в данном районе происходит путем седиментации взвеси вместе с перемывом и переотложением местного материала. При этом в пределах южной части поднятия Менделеева наблюдается широкое распространение современных аллювиально-делювиальных отложений. В северной части поднятия возрастает роль процессов перемыва с формированием более грубозернистых осадков.

Распределение основных компонентов РОВ определяется как литологическим составом осадочного материала, так и его природой. В изученных осадках поднятия Менделеева, несмотря на выдержанность гранулометрического состава [Кабаньков и др., 2008], содержание $C_{орг}$ и битумоидов в осадках южной части профиля (АФ-05-02) в среднем более чем вдвое превышает значения, наблюдаемые в его северной части (АФ-05-09, АФ-00-08) (рис. 2, а), что, очевидно, обусловлено более интенсивным поступлением в осадки подножия континентального склона современного слабо преобразованного шельфового осадочного материала.

Вариации содержания $C_{орг}$ и битумоидов в осадочном разрезе согласуются с изменениями литологического состава осадков, что указывает на генетическую общность последних с содержащимся в них РОВ и отражает возможные изменения фациальных условий осадконакопления. В осадках северной части меридионального профиля (АФ-05-09, АФ-00-08) распределение РОВ практически неизменно по всему стратиграфическому разрезу.

Содержание карбонатного углерода в осадочных отложениях варьирует в значительных пределах от 0.01 до 3.99 %, что превышает дисперсию и абсолютные значения данного параметра для шельфовых осадков Восточно-Арктического региона [Романкевич и др., 1982; Данюшевская и др., 1990; Романкевич, Ветров, 2001]. На меридиональном профиле практически бескарбонатные разности ($C_{карб} < 0.05$ %) юж-

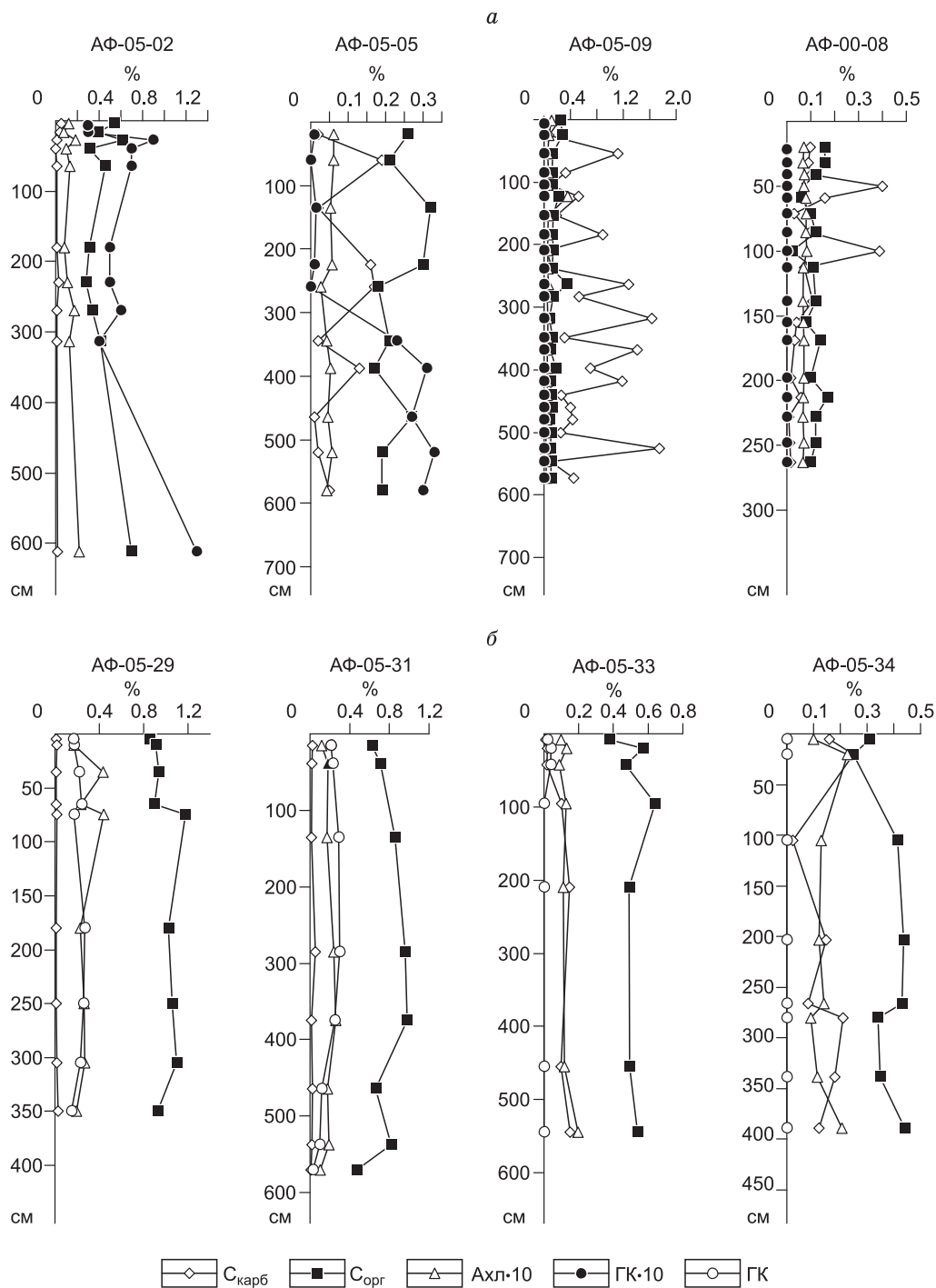


Рис. 2. Геохимическая характеристика РОВ донных осадков на профиле 1 (а), на профиле 2 (б).

Для АФ-00-08 $C_{carb}/10$.

ной части разреза сменяются в северном направлении осадками, содержащими значительное количество обломочного карбонатного материала (1—4 %), что наглядно свидетельствует о снижении в мористом направлении вклада терригенного шельфового материала в формирование рыхлых отложений.

В осадках северной части поднятия Менделеева в стратиграфическом разрезе наблюдается ряд максимумов содержания C_{carb} (см. рис. 2, а, АФ-00-08), приуроченных к прослоям или линзам известковых пелитов розового и светло-бежевого цвета, иногда с обломками раковинного детрита. Синхронно возрастают содержания песчаной фракции (в среднем на порядок) и планктонных фораминифер, обусловленные, по-видимому, сменой палеогеографических условий осадконакопления. Совокупность лито-

логических, микропалеонтологических и геохимических данных указывает на биогенно-обломочную природу карбонатов.

Распределение органического углерода в осадочном разрезе не коррелирует с распределением $C_{\text{карб}}$, что указывает на различные источники их поступления. Резкое снижение содержания $C_{\text{орг}}$ в северной части меридионального профиля вызвано, очевидно, низкими скоростями осадконакопления, незначительным поступлением свежего органического материала и/или его глубокой преобразованностью. Не превышая в верхних горизонтах 0.25 %, содержание $C_{\text{орг}}$ резко убывает уже на первых сантиметрах осадочного разреза, снижаясь далее до практически следовых величин (0.10—0.01 %).

Содержание органического азота ($N_{\text{орг}}$) в изученном осадочном разрезе не превышает 0.10 %, составляя в среднем 0.05 %. Столь низкие значения характерны для осадков абиссальных областей Тихого и Атлантического океанов [Романкевич, 1977] и свидетельствуют о глубокой степени преобразования исходного РОВ. Отношение C/N для всех изученных образцов варьирует в узком диапазоне 1.3—5.3, составляя в среднем 2.1, что не типично для четвертичных отложений Арктического региона, где даже в глубоководных осадках котловин Макарова, Амундсена и на хр. Ломоносова [Cranston, 1997] минимальное значение C/N = 7.3.

Специфика РОВ донных отложений поднятия Менделеева находит отражение и в его групповом составе. Так, содержание в них нерастворимых компонентов значительно выше, чем в осадках шельфа и глубоководных котловин Восточно-Арктического региона [Данюшевская и др., 1990] и составляет более 95 %. В составе растворимых компонентов отсутствуют гуминовые кислоты (ГК), а липидная фракция (битумоид Ахл) представлена преимущественно неполярными соединениями. Эти особенности геохимических параметров РОВ могут быть обусловлены значительным вкладом глубоко преобразованного осадочного материала в формирование рыхлых отложений поднятия Менделеева. По данным ряда публикаций последних лет, не исключено также незначительное поступление гидробионтного ОВ с атлантическими и/или тихоокеанскими водными массами [Stein et al., 1999; Kosobokova, Hirche, 2000; Матуль и др., 2007]. Вместе с тем эти поставки, по-видимому, не могут носить определяющий характер, поскольку хр. Ломоносова является барьером в циркуляции водных масс Евразийского бассейна [Cranston, 1997; Kosobokova, Hirche, 2000, 2005], а влияние тихоокеанских водных масс не распространяется на данный район Американо-Арктического бассейна [Stein et al., 1999; Stein, Macdonald, 2004; Goni et al., 2005].

Еще одним возможным источником исходного РОВ могут быть гидробионтные биопродуценты (фито- и зоопланктон). Однако проведенные набортные исследования водной толщи в 2005 г. показали, что максимальное содержание хлорофилла в данном районе составляет 0.1 мг/л, т.е. почти на порядок ниже наблюдавшегося на акватории моря Лаптевых [Juterzenka, Knickmeier, 1999]. Принимая во внимание, что в составе растворенного и взвешенного ОВ вышеуказанного региона основная масса гидробионтного материала нивелируется уже в поверхностном водном слое [Peulve et al., 1996], трудно предположить существенную роль гидробионтов в формировании состава ОВ осадков района поднятия Менделеева.

Профиль 2 (см. рис. 1) берет начало на кромке континентального шельфа севернее Новосибирских островов (море Лаптевых), пересекает континентальный склон и проходит вдоль западного склона хр. Ломоносова до центральной части котловины Амундсена в районе Северного полюса. Основной поток осадочного материала в этом районе контролируется мощным выносом речного стока и Трансполярным дрейфом [Kassens et al., 1999; Stein, Macdonald, 2004].

Изменения состава РОВ на разрезах река—море, отражая последовательность перехода от дельтово-эстуарных осадков к морским, позволяют оценить интенсивность и масштабы терригенного влияния на прилегающую акваторию [Артемьев, 1993; Yunker et al., 1993, Петрова, 2001; Petrova et al., 2004]. В мористом направлении наблюдается снижение содержания в осадках органического вещества, битумоидов, гуминовых кислот и углеводородов, возрастает полимеризованность органического материала, о чем свидетельствует увеличение доли остаточного органического вещества (ООВ). В составе углеводородов отмечается рост ароматических и утрата алифатических (Me-Nf) структур.

Осадочные отложения, отобранные на профиле 2 (см. рис. 1), в полной мере соответствуют характерным для данного района литолого-фациальным условиям осадконакопления. Осадки южной части разреза (см. рис. 1, АФ-05-29), приуроченные к кромке континентального шельфа и представленные мотонотной толщей алевропелитов (от серых до почти черных), являются типичными шельфовыми отложениями, обогащенными органическим веществом и сформированными в восстановительных условиях. Бескарбонатные разности ($C_{\text{карб}} < 0.05$ %), обогащенные $C_{\text{орг}}$ (>1 %), гуминовыми кислотами (до 0.30 %) и битумоидными компонентами (до 0.07 %), отражают значительный масштаб поступления в этот район гумусового осадочного материала, поставляемого мощным речным стоком (см. рис. 2, б).

В осадочном разрезе зоны континентального склона (АФ-05-31) и его подножия (АФ-05-33) интенсивное влияние терригенного сноса в целом сохраняется ($C_{\text{карб}} < 0.01$, $C_{\text{орг}} = 0.50—0.80$ %, ГК = 0.03—0.19 %), несколько нивелируясь лишь в осадках центральной части котловины Амундсена (АФ-05-34),

где в осадочном разрезе чередуются бескарбонатные и слабокарбонатные ($C_{\text{карб}}$ до 0.20 %) прослои с фоновым для глубоководной части СЛО содержанием $C_{\text{орг}}$ (<0.40 %). Полученные результаты согласуются с данным, приведенным в работе [Belicka et al., 2002], согласно которым в донных осадках, отобранных на Северном полюсе, фиксируется ОВ смешанного гидробионтно-терригенного генезиса ($C/N < 10$).

Углеводородные молекулярные маркеры в донных отложениях. Предшествующие исследования донных отложений восточно-арктического шельфа [Данюшевская и др., 1990] показали, что в целом по акватории в составе углеводородов устойчиво доминируют метаноафтеневые структуры (80—90 %), что свойственно современным осадкам, содержащим слабо преобразованное органическое вещество. Однообразие состава УВ осадков эстуарно-дельтовой и прибрежно-шельфовой фациальных зон позволяет предположить единый генезис РОВ, а сходство геохимических параметров осадков и растительного детрита подтверждает его преимущественно гумусовую природу [Petrova et al., 2004].

Сопоставление состава молекулярных маркеров поверхностных шельфовых осадков и обнаруженных в них прослоев деструктурированных тундровых макрофитов подтверждает значительную роль остатков наземной растительности в составе РОВ ($C_{17-19}/C_{27-31} = 0.19-0.39$ при индексе нечетности $OEP_{27-29} = 2-4$). Маркеры гидробионтов наблюдаются лишь в осадках континентального склона и в зоне Великой Сибирской полыньи, севернее и северо-западнее Новосибирских островов. Это согласуется с обнаружением в этих районах продуктов деградации диатомовых микроорганизмов и динофлагеллят — жирных кислот состава 16:1(*n*-7) и 20:5(*n*-3) [Fahl, Stein, 1997; Stein et al., 1999].

В осадочном разрезе плейстоцен-голоценовых отложений шельфовой зоны характер распределения алкановых УВ сохраняется и также свидетельствует о преимущественно гумусовой природе РОВ, низком уровне его диагенетической зрелости и стабильных условиях осадконакопления ($n-C_{17/29} < 1$, $OEP_{27-31} > 2$). Состав цикланов подтверждает в основном терригенный генезис и низкий уровень трансформации РОВ (для гопанов $Ts/Tm < 0.30$, $22S/(22R + 22S) = 0.17$; для стеранов $C_{29/27} = 1.5$, $20S/(20R + 20S) = 0.38$). В составе полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) преобладают перилен и алкилгомологи хризена, маркирующие поток терригенного осадочного материала [Петрова и др., 2008].

Представление о региональном фоне распределения углеводородных маркеров в осадках восточно-арктического шельфа создает основу для корректного рассмотрения аналитических данных, полученных в рамках данной работы.

Профиль 1. В осадочном разрезе южной части поднятия Менделеева (АФ-05-02, АФ-05-05) бимодальное распределение *n*-алканов свидетельствует о смешанном генезисе и двух основных источниках РОВ (рис. 3, а). Высокомолекулярные (C_{27-31}) соединения с относительно высоким индексом нечетности ($OEP_{27-31} > 3$) маркируют поток гумусового осадочного материала, поступающего с шельфа Восточно-Сибирского моря. Низкомолекулярные (C_{17-19}) *n*-алканы с низким индексом нечетности ($OEP_{17-19} < 1$) свидетельствуют об участии в формировании состава осадков глубоко преобразованного РОВ, аквагенного и/или перотложенного *in situ*. При этом в северной части меридионального профиля роль преобразованного материала заметно возрастает. Вариации соотношения современного и преобразованного РОВ по осадочному разрезу, по-видимому, соответствуют режиму осадконакопления в каждый конкретный геологический период и отражают изменение масштабов поступления шельфового ($C_{17-19}/C_{27-31} < 0.4$) и местного переотложенного ($C_{17-19}/C_{27-31} > 0.5$) осадочного материала.

Характер распределения терпеноидных биомаркеров также отражает последовательное снижение в северном направлении доли современного гумусового материала, поступающего с шельфа, и увеличение относительного содержания глубоко преобразованного материала. Так, в осадочном разрезе южной части меридионального профиля (АФ-05-02) средние значения гопановых коэффициентов зрелости соответствуют диагенетической и постдиагенетической стадиям преобразования РОВ: $Ts/Tm = 0.49$; $22S/(22R + 22S) = 0.50$ (таблица). В северном направлении показатели уровня зрелости РОВ закономерно возрастают и достигают значений, характерных для пород, содержащих катагенетически преобразованное ОВ [Peters, Moldowan, 1994; Каширцев, 2003].

Наиболее отчетливо это проявляется в осадочных отложениях северной оконечности меридионального профиля (АФ-00-08). Здесь в составе *n*-алканов по всему стратиграфическому разрезу доминируют низкомолекулярные соединения с низким значением индекса нечетности $OEP < 1.0$ (см. рис. 3, а, таблицу). Коэффициенты, отражающие степень преобразования тритерпановых УВ, свидетельствуют о **катагенетическом** уровне зрелости РОВ (для гопанов $Ts/Tm = 0.73$; $22S/(22R + 22S) = 0.63$; для стеранов: $20S/(20R + 20S) = 0.48$). В составе полиароматических углеводородов (ПАУ) доминируют фенантрен и его алкилгомологи, при этом значение фенантеновых индексов соответствует постдиагенетической стадии преобразования РОВ ($MPI_1 > 1$) [Peters, Moldowan, 1994]. Циклические и полиароматические углеводородные маркеры терригенного РОВ не зафиксированы.

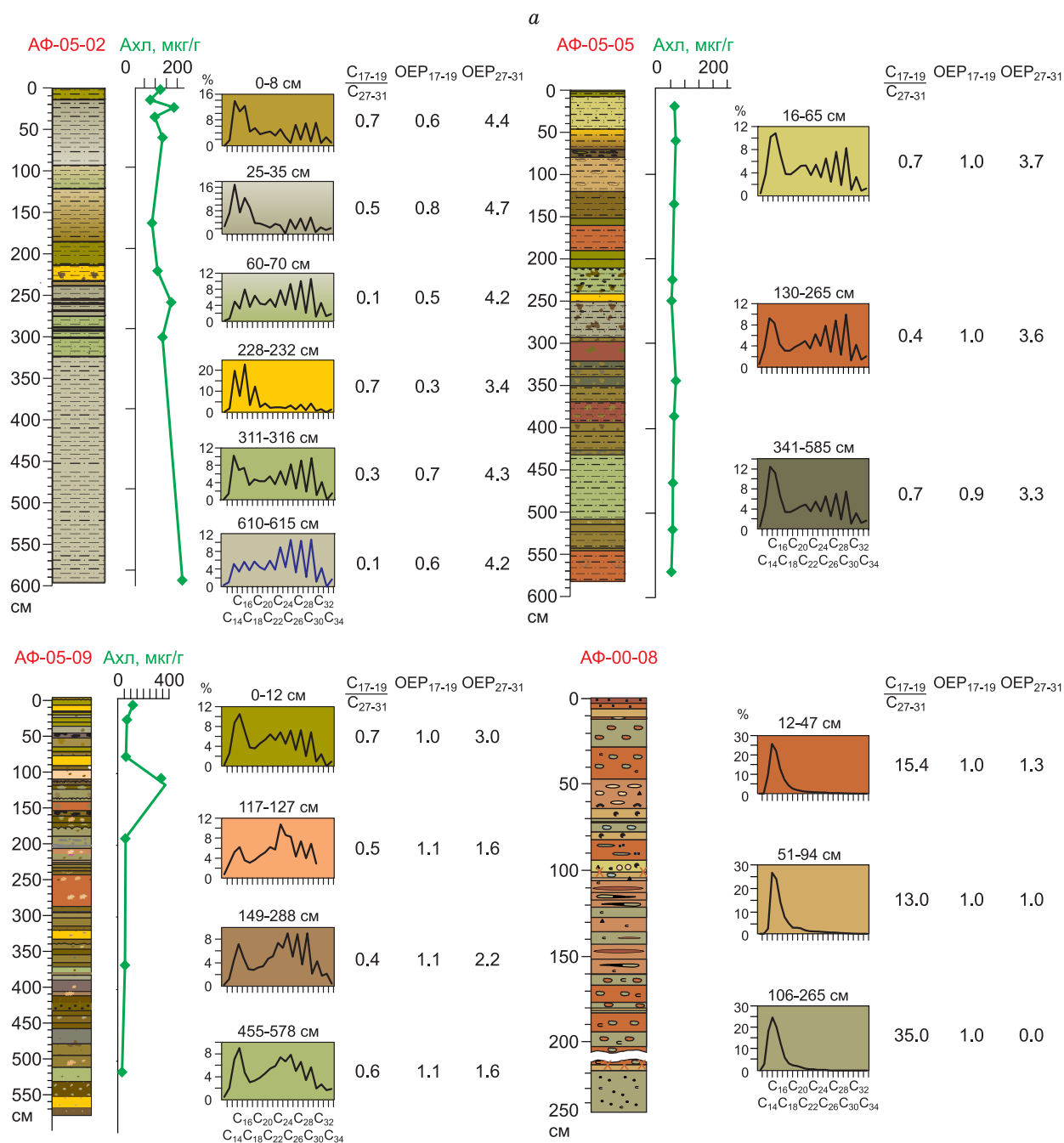


Рис. 3. Начало.

Подобный характер распределения углеводородов не является типичным для глубоководных осадков Арктического региона. В осадках, отобранных в котловинах Нансена, Амундсена и Подводников у подножия континентального склона и в зонах сочленения с хребтами Гаккеля и Ломоносова, распределение *n*-алканов отражает доминирование в осадках слабо преобразованного гидробионтного РОВ ($\max n-C_{15-17}$, $OEP_{15-17} > 1$), присутствие которого находится в полном соответствии с данными о поступлении в эти районы вдоль континентального склона атлантических вод [Kosobokova, Hirche, 2000]. Терригенные компоненты, несмотря на существенно более низкое содержание, чем в шельфовых разностях, тем не менее фиксируются во всех изученных глубоководных осадках региона [Fahl, Stein, 1997; Schubert, Stein, 1997].

Дальний гидросферный и аэрозольный перенос терригенного ОВ даже в абиссальные районы океанских котловин отмечался в значительном числе публикаций [Данюшевская и др., 1990; Петрова, Батова, 1991; Биогеохимия..., 1994; Rachold et al., 2004]. Лишь в районах с интенсивной первичной биопро-

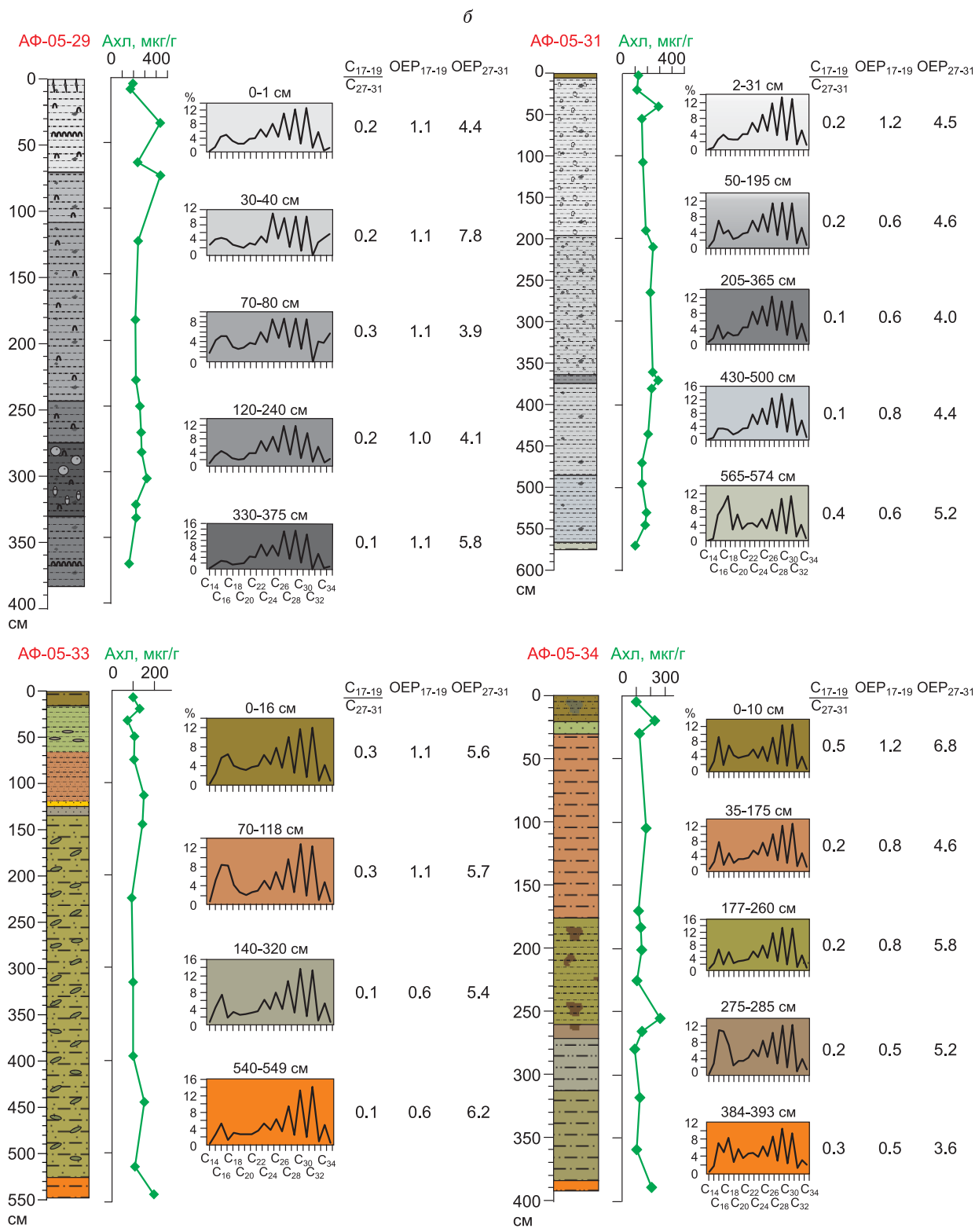


Рис. 3. Молекулярные маркеры в донных отложениях на меридиональном профиле 1 (а), профиле 2 (б).

Детальное описание литологических разрезов, по [Кабаньков и др., 2004].

Гопановые коэффициенты зрелости ОВ донных осадков

Компонент	Профиль 1				Профиль 2			
	АФ-05-02	АФ-05-05	АФ-05-09	АФ-00-08	АФ-05-29	АФ-05-31	АФ-05-33	АФ-00-34
Ts/Tm	0.49	0.50	0.54	0.73	0.33	0.33	0.44	0.48
22S	0.50	0.56	0.62	0.63	0.49	0.43	0.54	0.55
22S + 22R								

дуктивностью терригенная составляющая в значительной мере маскируется мощным потоком продуктов жизнедеятельности гидробионтов [Романкевич, 1977]. Район поднятия Менделеева не может быть отнесен к зонам повышенной первичной биопродукции, о чем наглядно свидетельствуют приведенные выше данные по содержанию хлорофилла в поверхностных водах данного района. Следовательно, отсутствие в осадочных отложениях поднятия Менделеева отчетливо выраженных следов терригенного ОВ не является тривиальным.

Профиль 2. В осадочных отложениях кромки континентального шельфа моря Лаптевых (см. рис. 3, б, АФ-05-29) в распределении *n*-алканов преобладают молекулярные маркеры гумусового ОВ, устойчиво доминируя во всем стратиграфическом разрезе ($C_{17-19}/C_{27-31} = 0.1-0.3$). Высокое значение индекса нечетности ($OEP > 4$), достигающее в отдельных прослоях аномальных значений (до 7.8), свидетельствует о низкой степени диагенетической зрелости РОВ и ведущей роли речного стока в поставке в этот район осадочного материала. Данный вывод согласуется с приуроченностью изученных отложений к палеоруслу р. Яна — одной из основных транзитных зон шельфа моря Лаптевых [Павлидис и др., 1998]. Резкое снижение степени преобразованности РОВ в ряде нижних горизонтов осадочного разреза может быть связано с изменением гидродинамического режима акватории и/или приближением источников сноса в ходе регрессии.

В осадках подножия континентального склона (АФ-05-31) низкий уровень преобразования и преимущественно терригенный состав РОВ также сохраняется во всем стратиграфическом разрезе. И лишь в глубоководных отложениях, отобранных на западном борте хр. Ломоносова (АФ-05-33), в ряде прослоев наблюдаются маркеры гидробионтного ОВ, играющего, однако, сугубо подчиненную роль (см. рис. 3, б). Низкое значение индексов нечетности гидробионтных *n*-алканов, т.е. высокая степень их трансформации, свидетельствует либо о дальнем их переносе, возможно океанскими атлантическими водами, либо об интенсивной биодеградации *in situ* в период дегляциации.

Бимодальное распределение *n*-алканов в осадках северной части разреза, приуроченных к району Северного полюса (АФ-05-34), указывает на смешанный гумусово-гидробионтный генезис ОВ, с преобладанием терригенной составляющей. Сохранение высоких значений индексов нечетности гумусовых молекулярных маркеров может быть обусловлено низкой интенсивностью процессов постседиментационной трансформации органической составляющей осадков в полярных условиях. В то же время это является подтверждением устойчивой и интенсивной поставки в позднем кайнозое в глубоководную часть арктического бассейна шельфового осадочного материала. Об этом же свидетельствует и распределение ПАУ, в составе которых присутствуют ретен, перилен и алкилгомологи хризена, маркирующие поток терригенного осадочного материала [Venkatesan, 1988; Yunker et al., 1993; Bastow et al., 2001; Петрова и др., 2008].

Следует отметить, что значительная роль гумусового ОВ в донных отложениях глубоководной зоны СЛО наблюдается как в котловинах, так и на поднятиях [Schubert, Stein, 1997]. Данная информация лишней раз подчеркивает своеобразие ОВ осадочных отложений северной части поднятия Менделеева, в которых гумусовые компоненты практически отсутствуют.

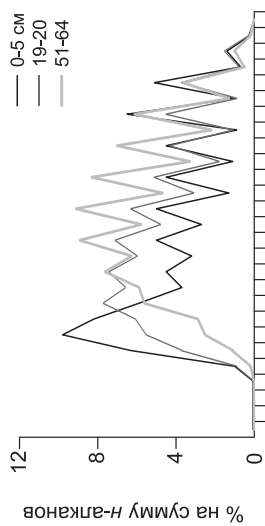
Анализ состава и распределения в осадках гопанов и гопаноидов свидетельствует о низкой степени преобразования ОВ. На это указывает преобладание в их составе биогенных гопенов и ββ-изомеров, а также низкие величины гопановых коэффициентов зрелости (см. таблицу), соответствующих стадии раннего диагенеза. Лишь в осадочном разрезе отложений центральной части котловины Амундсена (АФ-05-34) показатели зрелости РОВ достигают значений, характерных для постдиагенетической стадии преобразования, наблюдавшихся в осадках южной части поднятия Менделеева. Отложений, содержащих РОВ, достигшее катагенетической стадии зрелости, в данном районе не обнаружено.

ВЫВОДЫ

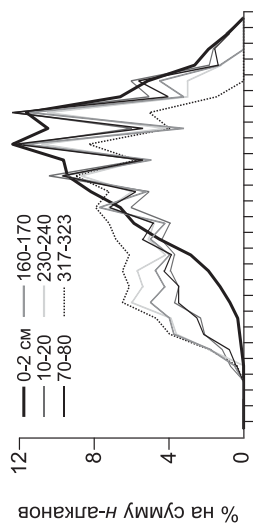
В результате проведенных исследований показана ведущая роль терригенного материала в формировании рыхлого осадочного чехла восточной части СЛО в позднем кайнозое, наиболее ярко выраженная для восточно-евразийской части Арктического бассейна, вплоть до зоны Северного полюса.

Сравнительный анализ выявил принципиальное различие геохимических параметров четвертичных отложений Восточно-Арктической континентальной окраины и поднятия Менделеева, РОВ которо-

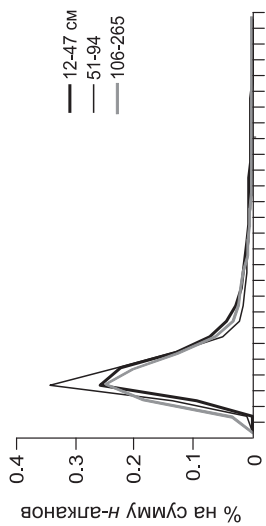
Распределение n-алканов



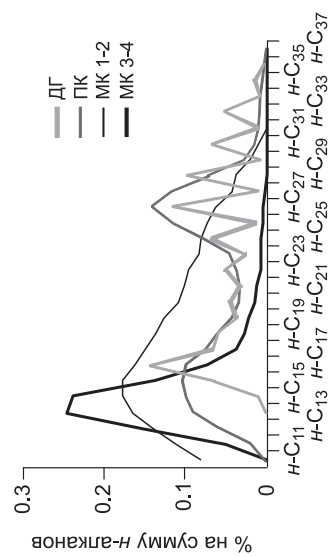
Донные осадки шельфа



Донные осадки континентального склона



Донные осадки поднятия Менделеева



Осадочные породы стадий диагенеза (ДГ), прото- и мезокатагенеза (ПК, МК)

Характеристика гопанов и стеранов

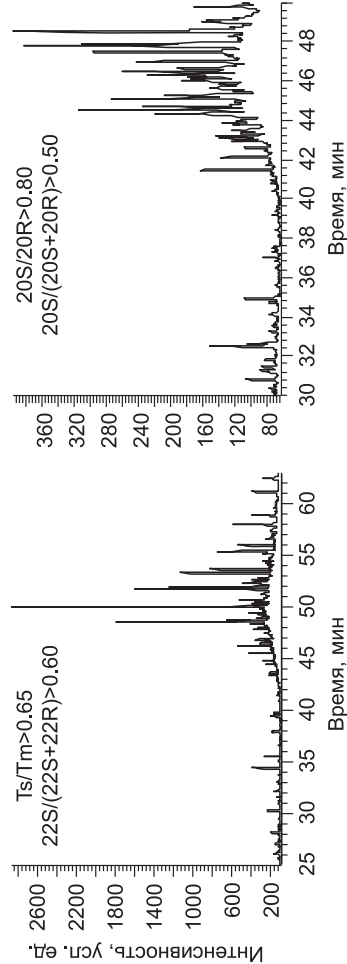
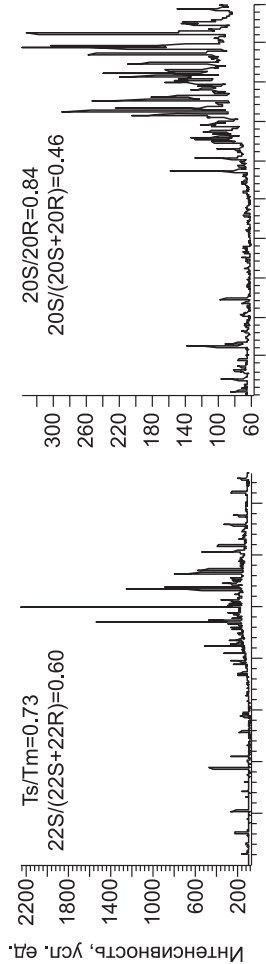
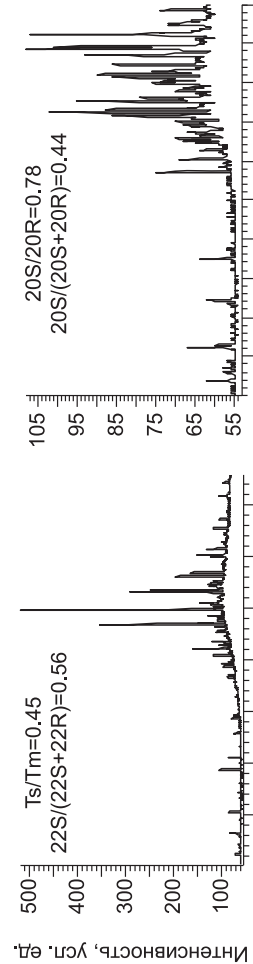
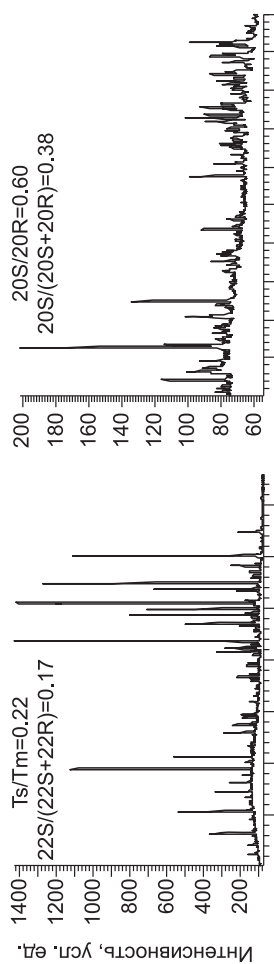


Рис. 4. Распределение углеводородных маркеров в донных осадках Американо-арктического бассейна и осадочных породах Западной Сибири.

го не типично для современных донных отложений и скорее характерно для глубоко преобразованных осадочных пород (рис. 4).

Принимая во внимание многообразие факторов, определяющих композиционный состав РОВ осадочных отложений и, соответственно, статистический характер значений геохимических параметров, можно говорить лишь о преобладании тех или иных компонентов. Комплекс полученных данных позволяет сделать вывод, что в формировании плейстоцен-голоценовых отложений осевой части поднятия Менделеева значительную роль играют древние осадочные породы, содержащие генетически однородное и глубоко преобразованное ОВ, достигшее уровня мезокатагенеза [Конторович, 2004а,б].

ЛИТЕРАТУРА

- Артемьев В.А.** Геохимия органического вещества в системе река—море. М., Наука, 1993, 204 с.
- Беляева А.Н.** Молекулярный состав органического вещества в океане // Новые идеи в океанологии. Т. 1. Физика. Химия. Биология / Под ред. М.Е. Виноградова, С.С. Лаппо. М., Наука, 2004, с. 325—350.
- Биогеохимия** пограничных зон Атлантического океана / Ред. Е.А. Романкевич. М., Наука, 1994, 400 с.
- Вернадский В.И.** Живое вещество в химии моря // Биогеохимические очерки. М., Л., Изд-во АН СССР, 1940, с. 25—46.
- Данюшевская А.И., Петрова В.И., Яшин Д.С., Батова Г.И., Артемьев В.Е.** Органическое вещество донных осадков полярных зон Мирового океана. Л., Недра, 1990, 280 с.
- Кабаньков В.Я., Андреева И.А., Иванов В.Н., Петрова В.И.** О геотектонической природе системы центрально-арктических морфоструктур и геологическое значение донных осадков в ее определении // Геотектоника, 2004а, № 6, с. 33—44.
- Кабаньков В.Я., Андреева И.А., Иванов В.Н.** О происхождении донных осадков, поднятых на геотраверзе Арктика-2000 в Северном Ледовитом океане (район поднятия Менделеева) // Докл. РАН, 2004б, т. 399, № 2, с. 224—226.
- Кабаньков В.Я., Андреева И.А., Крупская В.В., Каминский Д.В., Разуваева Е.И.** Новые данные о составе и происхождении донных осадков южной части поднятия Менделеева (Северный Ледовитый океан) // Докл. РАН, 2008, т. 419, № 5, с. 653—655.
- Каширцев В.А.** Органическая геохимия нафтидов востока Сибирской платформы / Ред. А.Э. Конторович. Якутск, ЯФ Изд-ва СО РАН, 2003, 160 с.
- Конторович А.Э.** Очерки теории нафтидогенеза. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2004а, 548 с.
- Конторович А.Э.** Эволюция нафтидогенеза в истории Земли // Геология и геофизика, 2004б, т. 45 (7), с. 784—802.
- Конторович А.Э., Полякова И.Д., Фомичев А.С.** Закономерности накопления органического вещества в древних осадочных породах (на примере мезозойских отложений Сибири) // Литология и полезные ископаемые, 1971, № 6, с. 16—27.
- Лисицын А.П.** Потоки осадочного вещества, природные фильтры и осадочные системы «живого океана» // Геология и геофизика, 2004, т. 45 (1), с. 15—48.
- Матуль А.Г., Хусид Т.А., Мухина В.В., Чеховская М.П., Сафарова С.А.** Современные и позднеголоценовые природные условия на шельфе юго-восточной части моря Лаптевых по данным микрофоссилий // Океанология, 2007, т. 47, № 1, с. 90—101.
- Нарышкин Г.Д.** Орографическая карта Арктического бассейна. СПб., ГУНиО, 1995.
- Павлидис Ю.А., Ионин А.С., Щербаков Ф.А., Дунаев Н.Н., Никифоров С.Л.** Арктический шельф. Позднечетвертичная история как основа прогноза развития. М., ГЕОС, 1998, 198 с.
- Петров Ал.А.** Углеводороды нефти. М., Наука, 1984, 264 с.
- Петрова В.И.** Геохимия полициклических аренов на разрезе река—море // Геохимия, 2001, № 10, с. 1108—1115.
- Петрова В.И., Батова Г.И.** Геохимические особенности органического вещества глубоководных океанских осадков // Геохимия, 1991, № 9, с. 1275—1283.
- Петрова В.И., Батова Г.И., Куршева А.В., Литвиненко И.В., Савинов В.М., Савинова Т.Н.** Геохимия полициклических ароматических углеводородов донных осадков восточно-арктического шельфа // Океанология, 2008, № 2, с. 215—223.
- Романкевич Е.А.** Геохимия органического вещества в океане. М., Наука, 1977, 256 с.
- Романкевич Е.А., Ветров А.А.** Цикл углерода в арктических морях России. М., Наука, 2001, 302 с.

Романкевич Е.А., Данюшевская А.И., Беляева А.Н., Русанов В.Н. Биогеохимия органического вещества арктических морей. М., Наука, 1982, 239 с.

Чахмахчев В.А., Виноградова Т.Л. Геохимические показатели фациально-генетических типов исходного органического вещества // Геохимия, 2003, № 5, с. 554—560.

Bastow T.P., Singh R.K., van Aarssen B.G.K., Alexander R., Kagi R.I. 2-Methylretene in sedimentary material: a new higher plant biomarker // Org. Geochem., 2001, v. 32, p. 1211—1217.

Belicka L., Macdonald R.W., Harvey H.R. Sources and transport of organic carbon to shelf, slope and basin surface sediment of the Arctic Ocean // Deep-Sea Research Part I. 2002, v. 49, p. 1463—1483.

Brassell S., Eglinton G., Howell V. Paleoenvironmental assessment of marine organic-rich sediments using molecular organic geochemistry / Eds. J. Brooks, A. Fleet // Marine petroleum source rocks, Geological Society Special Publication, 1987, № 26, p. 79—98.

Cranston R.E. Organic carbon burial rates across the Arctic Ocean from the 1994 Arctic Ocean Section expedition // Deep-Sea Research. Part II. 1997, v. 44, № 8, p. 1705—1723.

Duan Yi., Ma L. Lipid geochemistry in a sediment core from Ruorgai Marsh deposit (Eastern Qinghai-Tibet plateau, China) // Org. Geochem., 2001, v. 32, p. 1429—1442.

Eglinton G., Murphy M.T.J. Organic geochemistry: method and results. Berlin, Springer, 1969, 828 p.

Fahl K., Stein R. Modern organic carbon deposition in the Laptev Sea and the adjacent continental slope: surface-water productivity vs terrigenous input // Org. Geochem., 1997, v. 26, p. 379—390.

Goni M., Yunker M., Macdonald R., Eglinton T. The supply and preservation of ancient and modern sediments of organic carbon in the Canadian Beaufort Shelf of the Arctic Ocean // Mar. Chem., 2005, v. 93, p. 53—73.

Greenwood P.F., Leenheer J.A., McIntyre C., Berwick L., Franzmann P.D. Bacterial biomarkers thermally released from dissolved organic matter // Org. Geochem., 2006, v. 37, p. 597—609.

Hauteville Y., Michels R., Malartre F., Trouiller A. Vascular plant biomarkers as proxies for paleoflora and paleoclimatic changes at the Dogger/Malm transition of the Paris Basin (France) // Org. Geochem., 2006, v. 37, p. 610—625.

Hedges J., Prahl F. Early diagenesis: consequences for application of molecular biomarkers // Organic geochemistry: principles and application / Eds. M. Engel, S. Macko. New-York, Plenum Press, 1993, p. 237—253.

Juterzenka K.V., Knickmeier K. Chlorophyll *a* distribution in water column and sea ice during the Laptev Sea freeze-up study I autumn 1995 // Land—ocean systems in the Siberian Arctic: dynamic and history / Eds. H. Kassens et al. Berlin, Heidelberg, New York, Springer, 1999, p. 153—160.

Kassens H., Bauch H. A., Dmitrienko I.A., Eicken H., Hubberten H.-W., Melles M., Thide J., Timokhov L.A. Land—ocean systems in the Siberian Arctic: dynamics and history. Berlin, Heidelberg, New York, Springer, 1999, 711 p.

Keil R.G., Montlucon D., Prahl F., Hedges J.I. Sorptive preservation of labile organic matter in marine sediments // Nature, 1994, v. 370, p. 549—552.

Knies J., Nowaczyk N., Muller C., Vogt C., Stein R. A multiproxy approach to reconstruct environmental change along the Eurasian continental margin over the last 150 000 years // Mar. Geol., 2000, v. 163, p. 317—344.

Kosobokova K.N., Hirche H.-J. Zooplankton distribution across the Lomonosov Ridge, Arctic Ocean: species inventory, biomass and vertical structure // Deep-Sea Research Part I, 2000, v. 47, p. 2029—2060.

Kosobokova K.N., Hirche H.-J. Distribution of *Calanus* species in the western Arctic Ocean // Abstracts of the ASLO summer meeting, June 19—24, 2005. Santiago de Compostella, Spain, 2005, p. 82.

Peters K., Moldowan J. The biomarker guide. Interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments. New Jersey, Cambridge, 1994, 364 p.

Petrova V.I., Batova G.I., Zinchenko A.G., Kursheva A.V., Narkevskiy E.V. The East Siberian Sea: distribution, sources, and burial of organic carbon // Organic carbon in Arctic Ocean sediments: sources, variability, burial and paleoenvironmental significance / Eds. R. Stein, R.V. Macdonald. Berlin, Heidelberg, New-York, Springer, 2004, p. 204—212.

Peulve S., Sicre M.-A., Saliot A., De Leeuw J.W., Baas M. Molecular characterization of suspended and sedimentary organic matter in an Arctic Delta // Limnol. Oceanogr., 1996, v. 41, № 3, p. 488—497.

Rachold V., Eicken H., Gordeev V.V., Grigoriev M.N., Hubberten H.-W., Lisitzin A.P., Shevchenko V.P., Schirmeister L. Modern terrigenous organic carbon input to the Arctic Ocean // The organic carbon cycle in the Arctic Ocean / Eds. R. Stein, R.-W. Macdonald. Berlin, Springer-Verlag, New York, Heidelberg, 2004, p. 33—54.

Salot A., Laureillard J., Scribe P., Sicre M.A. Evolutionary trends in the lipid biomarker approach for investigating the biogeochemistry of organic matter in the marine environment // *Mar. Chem.*, 1992, № 39, p. 235—248.

Schubert C., Stein R. Deposition of organic carbon in Arctic Ocean sediments: terrigenous supply vs. marine production // *Org. Geochem.*, 1996, v. 24, № 4, p. 421—436.

Schubert C., Stein R. Lipid distribution in surface sediments from the eastern central Arctic Ocean // *Mar. Geol.*, 1997, v. 138, p. 11—25.

Stein R., Macdonald R.W. The organic carbon cycle in the Arctic Ocean. Berlin, New-York, Heidelberg, Springer-Verlag, 2004, 363 p.

Stein R., Fhal K., Niessen F., Siebold M. Late Quaternary organic carbon and biomarker records from Laptev Sea continental margin (Arctic Ocean): implication for organic carbon flux and composition // *Land—ocean systems in the Siberian Arctic: dynamics and history* / Eds. H. Kassens et al. Berlin, Heidelberg, Springer, 1999, p. 635—657.

Stojanovic K., Jovancicevic B., Pevneva G.S., Golovko J.A., Golovko A.K., Pfenndt P. Maturity assessment of oils from the Sakhalin oil fields in Russia: phenanthrene content as a toll // *Org. Geochem.*, 2001, v. 32, p. 721—731.

Venkatesan M. Occurrence and possible sources of perylene in marine sediments // *Mar. Chem.*, 1988, v. 25, № 1, p. 1—27.

Venkatesan M., Kaplan I. Distribution and transport of hydrocarbons in surface sediments of the Alaskan Outer Continental Shelf // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1982, v. 46, p. 2135—2149.

Yunker M.B., Macdonald R.W., Fowler B.R., Cretney W.J., Dallimore S.R., McLaughlin F.A. Alkane, terpene and polycyclic aromatic hydrocarbon geochemistry of the Mackenzie River and Mackenzie shelf: riverine contributions to Beaufort Sea coastal sediment // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1993, v. 57, p. 3041—3061.

Weller P., Stein R. Paleogene biomarker record from the central Arctic Ocean (Integrated Ocean Drilling Program Expedition 302): organic carbon sources, anoxia, and sea surface temperature // *Paleoceanography*, 2008, v. 23, PA1S17, p. 1—15.

*Поступила в редакцию
5 сентября 2008 г.*