

Углеводородные молекулярные маркеры как индикаторы особенностей позднекайнозойского осадконакопления на Американо-Сибирской континентальной окраине

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

Аннотация

На основе геоморфологической, литологической и органо-геохимической характеристик исследовались основные факторы, контролирующие формирование в позднем кайнозое рыхлых осадочных отложений поднятия Менделеева и прилегающей части СЛО. Анализ группового и молекулярного состава рассеянного органического вещества (РОВ) осадков, отобранных в ходе научно-исследовательских рейсов НЭС «Академик Федоров» (2000, 2005, 2007 г.г.) и ледокола «Капитан Драницын» (2012 г.) показал, что голоцен-плейстоценовое осадконакопление на континентальном склоне Восточно-Сибирского моря и в котловине Подводников определяется преимущественно поступлением терригенного осадочного материала, обогащённого продуктами абразии литифицированных пород восточной питающей провинции. Индивидуальные особенности параметров, характеризующих РОВ позднекайнозойских отложений подводных гор поднятия Менделеева, отражают многообразие источников осадочного материала и условий его депонирования. Наряду с терригенным стоком и ледовым разносом в процессе осадконакопления определённую роль играют процессы субаквального размыва и переотложения продуктов денудации коренных пород и доголоценовых осадочных образований.

Ключевые слова:

Северный ледовитый океан, восточно-арктический шельф, донные отложения, рассеянное органическое вещество, биомаркеры

УГЛЕВОДОРОДНЫЕ МОЛЕКУЛЯРНЫЕ МАРКЕРЫ КАК ИНДИКАТОРЫ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОЗДНЕКАЙНОЗОЙСКОГО ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ НА АМЕРАЗИЙСКОЙ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ОКРАИНЕ (СЛО).

**В.И. Петрова, Г.И. Батова, А.В. Куршева, И.В. Литвиненко,
И.П. Моргунова**

ВНИИОкеангеология, 190121, Английский пр.1, С-Петербург, Россия

На основе геоморфологической, литологической и органо-геохимической характеристик исследовались основные факторы, контролирующие формирование в позднем кайнозое рыхлых осадочных отложений поднятия Менделеева и прилегающей части СЛО. Анализ группового и молекулярного состава рассеянного органического вещества (РОВ) осадков, отобранных в ходе научно-исследовательских рейсов НЭС «Академик Федоров» (2000, 2005, 2007 г.г.) и ледокола «Капитан Драницын» (2012 г.) показал, что голоцен-плейстоценовое осадконакопление на континентальном склоне Восточно-Сибирского моря и в котловине Подводников определяется преимущественно поступлением терригенного осадочного материала, обогащённого продуктами абразии литифицированных пород восточной питающей провинции. Индивидуальные особенности параметров, характеризующих РОВ позднекайнозойских отложений подводных гор поднятия Менделеева, отражают многообразие источников осадочного материала и условий его депонирования. Наряду с терригенным стоком и ледовым разносом в процессе осадконакопления определённую роль играют процессы субаквального размыва и переотложения продуктов денудации коренных пород и доголоценовых осадочных образований.

The main factors controlling the bulk sedimentation in the region of the Mendeleev Rise and adjacent part of the Arctic Ocean during the Late Cenozoic were studied using the complex of geomorphological, lithological and organic geochemical data. Samples for the study were collected during the cruises of R/V “Akademik Federov” in 2000, 2005, 2007 and icebreaker “Captain Dranitsin” in 2012. Analysis of the group and molecular composition of the dispersed organic matter (DOM) in bottom sediments has shown that the input of terrigenous sediments enriched with the abrasion products of lithified rocks from the eastern source province determines the Holocene – Pleistocene sedimentation on the continental slope of the East Siberian Sea and in the Podvodnikov Basin. The individual characteristics of DOM of the Late Cenozoic deposits from the underwater mountains of the Mendeleev Rise reflect the wide diversity of sedimentary sources and depositional conditions. Processes of the subaqueous erosion and redeposition of denudation products of the source rocks and pre-Holocene sediments play an important part in sedimentation process together with terrigenous flow and ice transport.

Введение

Глубоководная часть СЛО, как конечный бассейн седиментации, содержит в своих отложениях стратифицированную последовательность потоков осадочного вещества, позволяющих оценить вклад различных источников (терригенный сток, ледовый разнос, турбидитные потоки, океанские вдольсклоновые течения (контуритовые потоки), субаквальный размыв и переотложение коренных пород) в формирование осадочного чехла.

Согласно существующим представлениям [Yamamoto, Polyak 2009; Stein et al., 2009], состав рассеянного органического вещества (РОВ) осадочных отложений рыхлого чехла глубоководной части амеразийской континентальной окраины определяют два основных источника осадочного материала:

- в периоды ледниковья – гидросферный перенос терригенного гумусового органического вещества (ОВ);
- в периоды дегляциации – гидросферный перенос терригенного гумусового ОВ и ледовый/айсберговый разнос пород, содержащих термально зрелое (литифицированное) ОВ.

Роль процессов субаквального размыва и переотложения коренных пород в формировании донных осадков ставится под сомнение вследствие перекрытия их значительным по мощности осадочным чехлом мезо-кайнозойского возраста. Однако на двух сейсмических профилях, выполненных с борта ледокола HEALY, акустический фундамент подходит непосредственно к поверхности морского дна [Bruvoll et al., 2012]. Кроме того, по результатам сейсмического профилирования МОВ ОГТ (экспедиция «Арктика-2012»), юго-восточные склоны горы Шамшура, а также западные и восточные склоны горы Трукшина тоже представляют собой тектонически обусловленные выступы пород фундамента на поверхности морского дна [Гусев и др., 2014; Gusev et al., 2017].

В данной работе проведено сравнительное исследование молекулярного состава и распределения рассеянного органического вещества (РОВ) осадочных отложений с целью выявления источников поступления и условий формирования рыхлых отложений амеразийской континентальной окраины.

Материалы и методы

Материалом исследования послужили осадочные колонки, отобранные в ходе экспедиционных работ НИС «Академик Федоров» (2000, 2005, 2007, 2008 г.г.) и ДЛ «Капитан Драницын» (2012 г.) на двух меридиональных профилях, проходящих от континентального склона до 83° с.ш. (рис. 1). Образцы донных осадков отбирали из ударных трубок (до 6 м) с пластиковыми вкладышами в стерильную тару и сохраняли при

-18°C. Аналитическая процедура изучения РОВ включала: определение элементного состава - карбонатного (Скарб) и органического (Сорг) углерода, экстракцию битумоидов, определение их группового состава, хроматографическое выделение фракций насыщенных и ароматических углеводородов (УВ) с последующим их исследованием методом ГХ-МС на комплексе Hewlett Packard 5973/6850 с квадрупольным масс-детектором и программным пакетом обработки аналитической информации [Петрова и др., 2010, 2017].

Результаты и обсуждение

Профиль 1 берёт начало на наклонной равнине внешнего шельфа (АФ-07-29, АФ-08-06), пересекает в северном направлении верхнюю часть континентального склона (АФ-08-07), выходит на верхнюю террасу дна котловины Подводников (АФ-08-08) и заканчивается у её северной границы (АФ-08-11) [Арктический бассейн, 2017].

Осадочные колонки (до 300 см) представлены преимущественно бескарбонатными алевропелитами с невысоким содержанием органического углерода (Сорг = 0,3-0,8%) (рис. 2). Максимальное содержание Сорг наблюдалось в осадках колонки АФ-07-29, минимальное – в абиссальных осадках АФ-08-11, характеризующихся также несистематическими вариациями содержания Скарб (от 0,05 до 1,34 %), не отмеченными в осадочных разрезах континентального склона и его подножья.

Групповой состав РОВ (битумоиды, гуминовые кислоты и нерастворимые компоненты) свидетельствует о значительном уровне его трансформации (ООВ > 90%). При этом наибольшим уровнем преобразования (ООВ = 97,2%) отличаются отложения осадочного разреза ст. АФ-07-29, отобранные в южной части профиля (верхняя часть континентального склона). Этот парадоксальный факт, тем не менее, полностью согласуется с установленным ранее среднеплейстоценовым возрастом (~172 тыс. лет) осадочных отложений данного разреза [Гусев и др., 2013], что обуславливает позднедиагенетический уровень трансформации РОВ.

Вместе с тем, общая тенденция изменения распределения и группового состава растворимых компонентов РОВ (битумоидов и гуминовых кислот) в направлении шельф – пелагиаль соответствует основной геохимической закономерности, характерной для акваторий Мирового океана в целом [Романкевич, 1977] и Арктического региона в частности [Биогеохимия, 1980]. Так, в составе битумоидов снижается содержание полярных компонентов (смола и асфальтенов) и возрастает содержание углеводородов (рис. 2), отражая общую направленность диагенетической и постдиагенетической трансформации РОВ.

Профиль 2 берет начало на границе континентальный шельф – терраса Кучерова и проходит вдоль поднятия Менделеева (рис. 3). В геоморфологическом отношении поднятие Менделеева представляет собой систему погружающихся ступеней [Нарышкин, 1995; Кабаньков и др., 2004, 2008].

Осадочные отложения представлены пелитами и алевритистыми пелитами наряду с присутствием песков и гравелитов, распределение которых по разрезам достаточно хаотично. В пределах континентального склона осадки (АФ-05-02, АФ-05-05) представлены бескарбонатными (Скарб <0,1%) тонкозернистыми разностями с невысоким содержанием Сорг (<0,5%) (рис. 3). Однако уже в зоне южного склона поднятия Менделеева (АФ-05-09) среднее содержание Скарб заметно возрастает (до 0,6%), а его распределение по разрезу варьирует от 0,04% до 1,75%. При этом максимумы содержания Скарб, наблюдаемые по всему осадочному разрезу (600 см), лишь в нижней части разреза коррелируют с содержанием грубозернистой фракции (>63 μm) (рис. 3). Таким образом, обусловленность повышенных содержаний карбонатов материалом ледового разноса в данном случае представляется сомнительной. Кроме того, в этом осадочном разрезе не отмечалось наличие «розовых» прослоев, маркирующих, по существующим представлениям [Stein et al., 2009], поступление дрифтового карбонатного материала. Впрочем, согласно указанной публикации, содержащей описание осадочных разрезов на широтном профиле (77° с.ш.) вкрест простирания поднятия Менделеева, наличие этих прослоев более характерно для его восточного склона (PS72/340-5). Аналогичная тенденция наблюдается и в более высокоширотных осадочных отложениях (80° с.ш.). Сопоставление распределения Скарб и грубозернистой фракции в осадках западного подножья (АФ-00-23), центральной части (АФ-00-08) и восточного подножья (АФ-00-02) поднятия Менделеева свидетельствует о наличии взаимосвязи данных параметров в восточной и, особенно, в центральной части субширотного профиля. В разрезе осадков в котловине Подводников содержание Скарб резко снижается, а корреляция с грубозернистой фракцией отсутствует.

Наиболее высокие содержания Скарб (до 4%), которые могут быть соотнесены с «розовыми» прослоями, наблюдались в отложениях, отобранных в вершинной части г. Шамшура (АФ-00-08, КД-01-15) (рис. 3) и на восточном борту поднятия Менделеева, к юго-востоку от плато Почтарёва (Гусев и др., 2013) (КД-03-10). Однако, если в осадках колонки АФ-00-08 содержание Скарб отчётливо коррелирует с содержанием грубозернистой фракции (рис. 3), то в осадках колонки КД-03-10 их взаимосвязь не столь однозначна. Более того, в осадках верхней части разреза, минералогический состав которых характеризуется повышением содержанием доломитов, обломков карбонатной

органики [Рекант и др., 2013], и, соответственно Скарб, содержание грубозернистой фракции незначительно (менее 10%). Попытка корреляции данного осадочного разреза с разрезами, описанными ранее [HLY0503-08JPC, Yamamoto, Polyak 2008; PS-72/404-3 Stein et al., 2009] выглядит неубедительно, поскольку стратификация, представленная этими авторами, весьма различается, несмотря на близость расположения точек пробоотбора. Более того, согласно данным палеонтологических и магнитостратиграфических исследований осадочных отложений колонки КД-03-10 [Талденкова и др., 2016; Арктический бассейн, 2017], их возрастной диапазон оценивается в первом случае как неоплейстоценовый, а во втором как плиоценовый, что делает проведение палеореконовструкций пока весьма условным.

В северной части профиля две осадочные колонки были отобраны на двух полигонах, приуроченных к восточному (КД-05-23) и западному (КД-06-19) склонам г. Трукушина, детальное описание которых приведено в работе [Гусев и др., 2014]. Было показано, что на склоне западной экспозиции уклоны дна достигают 35°-50°. Наиболее крутые участки приурочены к бортам крупного подводного каньона. Зафиксирован выход коренных пород, неровная поверхность которых разбита трещинами. На восточном склоне уклоны дна также достигают 30°-40°.

Изученные осадочные колонки представлены бескарбонатными (Скарб <0,1%) алевропелитами с содержанием Сорг < 0,2%, корреляции содержания Скарб и гранулометрической фракции >63 μm не наблюдается. Групповой состав РОВ (ООВ до 98%) и его растворимых компонентов – битумоидов (рис. 3) свидетельствуют о значительном постдиагенетическом уровне трансформации.

Следует отметить, что в отличие от осадочных колонок, приуроченных к профилю 1, в осадочных отложениях профиля 2 не прослеживаются закономерных изменений состава и распределения РОВ, типичных для перехода от шельфовых к глубоководным фаціальным условиям осадконакопления. Напротив, каждый из изученных разрезов обладает сугубо индивидуальными чертами, свидетельствующими о существенных различиях, как в источниках поступления осадочного материала, так и в условиях его экспозиции. Наиболее контрастно это проявляется при рассмотрении молекулярного состава РОВ.

Характеристика молекулярного состава РОВ.

Распределение алифатических углеводородов в осадочных отложениях профиля 1 свидетельствует о значительном уровне преобразования и смешанном сапропеллево-гумусовом генезисе РОВ, сформированном в прибрежных и мелководно-морских условиях. Это наглядно отражает диаграмма Кеннона-Кассоу (рис. 4).

Характерное для РОВ смешанного типа бимодальное распределение н-алканов (табл. 1) с максимумами в низкомолекулярной (C17-19) и высокомолекулярной (C25-31) областях соответствует вкладу аквагенной и терригенной составляющих при закономерном снижении роли последней в мористом направлении (C17/C27 от 0,33 до 0,96) (табл. 1). В этом же направлении возрастает уровень трансформации РОВ, на что указывает снижение индексов нечетности (CPI и OEP), а также увеличение относительного содержания литифицированных (термально зрелых) алифатических УВ (Lithic/ Σ n-alk) [Yamamoto, Polyak 2009]. Наблюдаемое в осадочном разрезе колонки АФ-08-11 относительное увеличение содержания компонентов аквагенного РОВ (C17/C27 = 0,96) может быть обусловлено привнесом карбонатного осадочного материала как дрейфового, так и переотложенного. В целом, аналогии характера распределения н-алканов в поверхностных и погруженных (до 300 см) осадках свидетельствуют о стабильности условий позднечетвертичного осадконакопления.

Геохимические параметры, характеризующие состав алифатических углеводородов (н-алканов и изопреноидов) осадочных отложений на профиле 2 (вдоль поднятия Менделеева), свидетельствуют об их существенном своеобразии. Ни одна из отмеченных для профиля 1 закономерностей изменения состава и распределения н-алканов и изопреноидов в этих осадках не наблюдается. На диаграмме Кеннона-Кассоу (рис. 4) размытое поле точек, характеризующее всю совокупность изученных осадков, отражает многообразие уровня их термальной зрелости, генезиса и условий осадконакопления. Так, максимальным содержанием аквагенных компонентов характеризуются осадки континентального склона и южной части поднятия (АФ-05-02, АФ-05-05) (табл. 2).

Наибольшим уровнем трансформации РОВ характеризуются осадки восточного склона поднятия Менделеева (КД-03-10). Низкие значения индексов нечетности (CPI = 1,07, OEP17-19 = 0,59, OEP27-31 = 1,47), характерные для РОВ постдиагенетического уровня зрелости, в сочетании с высоким содержанием литифицированных н-алканов указывают на значительную роль зрелых литифицированных пород как источников осадочного материала.

Следует отметить, что РОВ данного осадочного разреза исключительно специфично. Если исходить из стратиграфической схемы, предложенной для этой колонки в работе [Талденкова и др, 2016], то отложения нижней части разреза (450 -570 см) старше MIS 16, и формирование их проходило в мягких условиях с сезонным ледовым покровом. Интервал 350-450 см соответствует MIS 16-13, и характеризуется активным поступлением материала ледового разноса с шельфа с Трансарктическим дрейфом. И, наконец, верхняя

часть разреза (MIS 12-1) отвечает развитию мощных ледовых покровов и поступлению карбонатов с круговоротом Бофорта.

Согласно анализу палеомагнитных данных [Арктический бассейн, 2017], скорости осадконакопления, при которых проходило формирование данного разреза, значительно ниже, чем предполагают предыдущие авторы и составляет не более 1,5 мм/тыс. лет. Соответственно, возраст нижней части разреза определён как плиоценовый (3,58 млн. лет). При этом авторы выделяют три интервала, характеризующихся прямой и обратной полярностями геомагнитного поля: 531-394,5 см, 394,5-123,5 см, <123,5 см, где 394 см – граница хронов Матуяма-Гаусс, а 123,5 см – граница хронов Брюнес-Матуяма.

Сопоставление геохимических параметров, характеризующих состав и распределение в осадках n-алканов и изопреноидов в соответствии с этапами осадконакопления, позволяют выделить три принципиально отличающихся совокупности (рис. 5). Осадки нижней части разреза (>350 см) содержат близкое по составу и уровню трансформации РОВ гумусо-сапропелевого генезиса ($C_{17}/C_{27} = 0,9-1,2$; $CPI = 1,3-1,6$; $Litic/\Sigma = 0,3-0,5$). Обильное поступление в осадочный бассейн слабо преобразованного ОВ со значительным вкладом аквагенной биоты вполне согласуется с представлением о климатическом оптимуме. Вверх по разрезу (<350 см) увеличивается содержание термально зрелого РОВ ($CPI = 0,8-0,9$; $Litic/\Sigma = 0,8-0,9$), что может быть обусловлено как терригенным стоком поддуктов абразии коренных пород, так и ледовым разносом. Наиболее контрастно выделяются осадки верхней части разреза (до 40 см), распределение n-алканов в которых характеризуется интенсивной деградацией низкомолекулярных соединений ($C_{17}/C_{27} = 0,13$) при аномальном доминировании чётных компонентов ($OEP_{17-19} = 0,44$).

Данная специфика состава n-алканов в интервале 0-40 см может свидетельствовать об интенсивной бактериальной переработке РОВ [Peters et al., 2004]. Это предположение согласуется с геоморфологической позицией станции КД-03-10, расположенной на восточном склоне поднятия Менделеева в зоне вытянутой структурной депрессии северо-западного простирания [Арктический бассейн, 2017]. Данная позиция позволяет предположить приуроченность осадочного разреза к зоне разломов и вероятной гидротермальной активности. На этом же склоне при драгировании были обнаружены многочисленные железомарганцевые корково-конкреционные образования, весьма необычные для глубоководной Арктики. В результате детальных исследований образцов ЖМК группа авторов [Константинова и др., 2016] пришла к выводу о гидротермальном генезисе нижнего и, возможно, среднего слоя корок, и гидрогенном – верхнего. Ещё одним свидетельством гидротермальной активности в данном районе является обнаружение

специфических карбонатных корок, очевидно аутигенных [Пахалко и др., 2017]. Источником поступления гидротермальных флюидов в пределах полигона может являться крупноамплитудный нормальный сброс, четко идентифицированный на сейсмическом профиле НЛУ 0521 [Гусев и др., 2014]. Сказанное выше, очевидно, и обуславливает специфику состава РОВ верхней части осадочного разреза.

В осадках северной части поднятия Менделеева, отобранных на г. Шамшура, парадоксально возрастает содержание терригенных компонентов ($C_{17}/C_{27} = 0,3-0,5$), при некотором снижении уровня их трансформации, превышающем, однако, значения, наблюдавшиеся в осадках котловины Подводников (профиль 1).

Дополнительные возможности по оценке уровня термальной зрелости РОВ и определения его генезиса открывает анализ состава молекулярных биомаркеров цикланового ряда – тритерпанов и стеранов. Значение гопановых коэффициентов термальной зрелости РОВ в осадках профиля 1 свидетельствует о значительном вкладе в его состав компонентов преобразованного геологического материала (рис. 6). Увеличение в северном направлении содержания трицикланов ($Tric/Нор$) с одной стороны может быть признаком доминирования в составе исходного ОБ эукариот [Конторович и др., 2009], что сомнительно, исходя из общей тенденции снижения содержания гумусового ОБ в мористом направлении. В тоже время известно, что трицикланы обладают большей термодинамической стабильностью, чем гопаны [Peters, Walters, Moldowan, 2004] и, соответственно, лучшей сохранностью в ходе трансформации РОВ. Прямая корреляция трицикланового индекса с другим показателем термальной зрелости – трисноргопановым индексом $Ts/(Ts+Tm)$, достигающим в изученных осадках значений, характерных для РОВ стадии мезокатагенеза ($>0,3$) [Фомин, 2011], подтверждает значительный уровень трансформации РОВ. Уровень термальной зрелости РОВ осадочных отложений на профиле 2 характеризуется сходными значениями, однако закономерного увеличения данных параметров в северном направлении не наблюдается, что может быть обусловлено существенным различием в происхождении и, соответственно, составе осадочного материала. Так, известно, что тритерпановый коэффициент зрелости ниже для сапропелевого органического вещества, чем терригенного [Фомин, 2011].

Стерановые коэффициенты зрелости, являющиеся индикаторами катагенных изменений РОВ, основаны на соотношении биоэпимеров ($\alpha\alpha R$) и более термодинамически устойчивых геоэпимеров ($\alpha\beta R$ и $\alpha\beta S$) [Peters, Walters, Moldowan, 2004]. Информативность стерановых коэффициентов ограничена термодинамическим пределом изомеризации, достигаемым на стадии катагенеза МК2.

На **рис. 7А** приведены графики корреляции стерановых коэффициентов термальной зрелости РОВ осадочных отложений профиля 1. Наибольшим уровнем трансформации характеризуются осадки южной (АФ-07-29) и северной (АФ-08-11) части профиля, что согласуется с характеристиками других групп молекулярных маркеров. Ещё одним показателем, позволяющим оценить уровень преобразования РОВ, является соотношение содержания в осадках геостеранов и их биогенных предшественников – стеренов (олеанена и фридоолеанена), характерных таксонов высшей наземной растительности. Этот показатель маркирует направленность поступления современного гумусового ОВ с терригенным стоком и отражает интенсивность его трансформации. Снижение в мористом направлении относительного содержания стеренов (**рис. 7В**) в осадках профиля 1 свидетельствует как об уменьшении роли гумусовой составляющей в составе РОВ, так и об увеличении степени его трансформации, что подтверждает корреляция данного показателя со стерановым коэффициентом зрелости К2.

Следовые содержания биоэпимеров стеранов в осадках профиля 2 не позволили их охарактеризовать по показателям термальной зрелости, однако это не сказалось на возможности определения генезиса РОВ.

Фациальные обстановки осадконакопления, в которых формировалось РОВ изученных осадочных отложений могут быть охарактеризованы соотношением стеранов состава С27-С29 – маркеров сапропелевого и гумусового ОВ. Согласно данной схеме (**рис. 8**), формирование РОВ осадков профиля 1 проходило преимущественно в прибрежных и мелководно-морских условиях, и лишь РОВ осадков северной части профиля приближается к зоне открытого моря. На профиле 2 РОВ осадков континентального склона и южной части поднятия Менделеева также могло быть сформировано в прибрежных фациях.

Однако состав стеранов осадочных отложений восточного склона поднятия (КД-03-10) указывает на выраженную аквагенную природу РОВ. Данное наблюдение находится в полном соответствии с характеристикой других групп углеводородных маркеров (н-алканов, изопреноидов, терпанов) и ещё раз подчёркивает специфичность РОВ этого осадочного разреза.

Соотношения различных групп биомаркеров, характеризующие вклад про- и эукариот, наглядно отражают доминирование в РОВ профиля 1 терригенной гумусовой составляющей, для которой характерно повышенное содержание стеранов и трициклана С23 (**рис. 9**). Для РОВ осадков профиля 2 значение этих показателей ещё раз подчёркивает неоднородность их генезиса. Так, осадки станции КД-03-10 характеризуются исключительно высоким содержанием молекулярных таксонов прокариот (Нор/St до 27),

что указывает на значительный вклад бактериального ОВ. Это полностью согласуется с предположением о палеогидротермальной активности в этом районе [Пахалко и др., 2017].

И, наконец, оценка уровня термальной зрелости РОВ может быть выполнена на основании соотношения молекул ароматического строения различной термодинамической устойчивости [Radke et al., 1988; Peters Walters, Moldowan, 2004]. Одним из таких показателей является метилфенантреновый индекс (MPI), отражающий отношение концентраций фенантрена и различных изомерных форм его монометилгомологов. Распределение этих компонентов контролируется уровнем катагенетической зрелости РОВ в широком диапазоне температур и находится в прямой корреляционной связи с показателем отражающей способности витринита (R°) [Фомин, 2011].

Для осадков профиля 1 значения данного параметра варьируют в пределах 0,2-0,6, отражая уровни трансформации РОВ по шкале катагенеза от ПК до МК2 (рис. 10). Наиболее низкими значениями MPI характеризуются осадки самой северной станции АФ-08-11. Этот парадоксальный факт обусловлен, очевидно, спецификой минерального состава осадков – обогащённостью карбонатами, что кардинально снижает значения данного показателя [Peters, Walters, Moldowan, 2004]. Максимальным уровнем термальной зрелости обладает РОВ осадков верхней части континентального склона (ст. АФ-08-06), что согласуется с приведёнными выше возвратными характеристиками данного осадочного разреза.

Соотношение фенантрена и его тетра-алкилгомолога ретена ($Ret/(Ret+Ph)$) с одной стороны позволяет оценить уровень трансформации РОВ, поскольку отражает процесс ароматизации и дезалкилирования биогенного предшественника фенантрена – абиетиновой кислоты в ходе диа- и протокатагенеза [Bastow et al., 2001]. С другой стороны, ретен является маркером ОВ голосеменной наземной растительности и позволяет оценить вклад терригенной компоненты в составе РОВ. На профиле 1 значение данного показателя закономерно снижается в мористом направлении (рис. 10).

Геохимические характеристики полиароматических УВ осадочных отложений поднятия Менделеева варьируют в еще более широком диапазоне ($MPI = 0,2-0,8$; $Ret/(Ret+Ph) = 0,01 - 1,0$), что свидетельствует о многообразии источников осадочного материала и генезиса содержащегося в нём РОВ. Наиболее специфичным составом полиаренов характеризуется РОВ осадков ст. КД-06-19. Наряду с повышенным содержанием продуктов трансформации эукариот ($C_{23} trisc/30H$ до 1,7) здесь наблюдается аномальный для глубоководных осадков состав ПАУ, доминирующим компонентом которых является ретен ($Ret/\Sigma PAH > 0,5$; $Ret/(Ret+Ph)$ до 0,9). Кроме того, распределение ретена в осадочном разрезе коррелирует с содержанием

литифицированных n-алканов C23-C33, характерных компонентов термально зрелого РОВ гумусового генезиса (рис. 11).

Значительное содержание ретена – молекулярного таксона гумусового ОВ в донных отложениях глубоководной части СЛО было зафиксировано ранее [Yamamoto et al., 2008; Petrova et al., 2013]. Однако наблюдалось оно в слабо преобразованном РОВ сероцветных пелитов наряду с другими характерными маркерами наземной биоты (олеаненами, тетрагидрохризенами, периленом), отсутствующими в данном осадочном разрезе, что ставит под сомнение возможность сопоставления данных объектов. Более вероятным аналогом могут быть меловые отложения Индигино-Зырянского прогиба на северо-востоке Якутии [Каширцев и др., 2012], характеристика молекулярного состава РОВ которых весьма сходна с наблюдаемыми в осадочном разрезе ст. KD-06-19 (рис. 11). Приуроченность данного осадочного разреза к борту крупного подводного каньона, где выше точки опробования зафиксирована граница регионального мелового несогласия [Рекант и др. 2015], позволяет предположить, что одним из источников осадочного материала являлись продукты подводного выветривания и переотложения коренных пород предположительно мелового возраста.

Выводы

- Проведены аналитические исследования донных отложений 17 осадочных колонок (273 обр.), отобранных на двух меридиональных профилях. Определены основные органо-геохимические параметры, включая состав и распределение углеводородных биомаркеров (алканов, изопреноидов, терпанов, стеранов, аренов), отражающие генезис и уровень термальной зрелости РОВ, что позволяет охарактеризовать источники, пути поступления и условия депонирования осадочного материала.
- Показано, что голоцен-плейстоценовое осадконакопление на континентальном склоне и в котловине Подводников (**профиль 1**) определяется преимущественно поступлением терригенного осадочного материала, обогащённого продуктами абразии метаморфизованных пород восточной питающей провинции. Об этом свидетельствует сходство основных геохимических параметров и высокий уровень термальной зрелости РОВ донных отложений.
- Индивидуальные особенности параметров, характеризующих РОВ позднекайнозойских отложений подводных гор Поднятия Менделеева (**профиль 2**), отражают многообразие источников осадочного материала и

условий его депонирования. Наряду с терригенным стоком и ледовым разносом в процессе осадконакопления определённую роль, очевидно, играют процессы субаквального размыва и переотложения продуктов денудации коренных пород и доголоценовых осадочных образований.

Список литературы

Арктический бассейн (геология и морфология). Ред. В.Д. Каминский. Санкт-Петербург, ВНИИОкеангеология, 2017, 291 с.

Биогеохимия органического вещества арктических морей. Москва, Наука, 1982, 240 с.

Гусев Е. А., Рекант П. В., Большеянов Д.Ю., Лукашенко Р. В., Попко А. О. Псевдогляциальные структуры подводных гор Поднятия Менделеева (Северный Ледовитый Океан) и континентальной окраины Восточно-Сибирского моря // Проблемы Арктики и Антарктики, 2013, №4 (98), с. 43-56.

Гусев Е. А., Лукашенко Р. В., Попко А. О., Рекант П. В., Миролюбова Е. С., Пяткова М. Н. Новые данные о строении склонов подводных гор поднятия Менделеева (Северный Ледовитый океан) // ДАН, 2014, т. 455, №2, с. 184-188.

Кабаньков В.Я., Андреева И.А., Иванов В.Н. О происхождении донных осадков, поднятых на геотраверсе “Арктика-2000” в Северном Ледовитом океане (район поднятия Менделеева). // ДАН, 2004, 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) // ДАН, 2008, т. 419, № 5, с. 653-655.

Каширцев В.А., Гайдук В.В., Зуева И.Н. Геохимия биомаркеров и катагенез органического вещества меловых и кайнозойских отложений Индигиро-Зырянского прогиба (Северо-Восточная Якутия) // Геология и геофизика, 2012, т. 53, № 8, с.1027-1039.

Константинова Н. П., Черкашёв Г.А., Новиков Г.В., Богданова О.Ю., Кузнецов В. Ю., Рекант П. В., J. A. P. Mirão, L. C. R. Dias, P. Madureira Железомарганцевые корки поднятия Менделеева: особенности состава и формирования // Арктика: экология и экономика, 2016, № 3 (23), с.16-28.

Конторович А.Э., Каширцев В.А., Данилова В.П., Костырева Е.А., Ким Н.С., Меленевский В.Н., Москвин В.И., Парфёнова Т.М., Тимошина И.Д., Фомин А.Н., Фурсенко Е.А. Молекулы-биомаркеры в ископаемом органическом веществе и нефтидах докембрийских и фанерозойских пород Сибири. Санкт-Петербург, ВНИГРИ, 2009, 108 с.

Нарышкин Г.Д. Орографическая карта Арктического бассейна (ГУНиО). Санкт-Петербург, ВНИИОкеангеология, 1995.

Пахалко А.Г., Крылов А.А., Миролюбова Е.С., Талденкова Е.Е., Рекант П.В. Первые находки плейстоценовых аутигенных карбонатных корок (АКК) на поднятии Менделеева, Северный Ледовитый океан V Международная конференция молодых учёных и специалистов памяти академика А.П. Карпинского. Санкт-Петербург, ВСЕГЕИ, тезисы докладов, 2017, с. 102-103.

Петрова В.И., Батова Г.И., Куршева А.В., Литвиненко И.В. // Геология и геофизика, 2010, т. 51, № 1, с.113-125.

Петрова В.И., Батова Г.И., Куршева А.В., Литвиненко И.В., Моргунова И.П. Молекулярная геохимия триасовых пород северо-восточной части Баренцева моря - влияние тектонических и магматических процессов // Геология и геофизика, 2017, т. 58, № 3-4, с.398-409.

Рекант П.В., Петров О.В., Кашубин С.Н., Рыбалка А.В., Винокуров И.Ю., Гусев Е. А. История формирования осадочного чехла глубоководной части арктического бассейна по данным сейсмических исследований МОВ-ОГТ // Региональная геология и металлогения, 2015, № 64, с.11-27.

Романкевич Е.А. Геохимия органического вещества в океане. Москва, Наука, 1977, 256 с.

Талденкова Е.Е., Николаев С.Д., Степанова А.Ю., Гусев Е.А., Рекант П.В., Кузнецов А.Б., Чистякова Н.О., Миролюбова Е.С., Новихина Е.С. Стратиграфия и палеогеография Американо-Арктического бассейна Арктики в неоплейстоцене по литологическим и палеонтологическим данным // Вестник Московского Университета, Сер.5, география, 2016, № 6, с. 3-17.

Фомин А. Н. Катагенез органического вещества и нефтегазоносности мезозойских и палеозойских отложений западно-сибирского мегабассейна. Новосибирск, ИНГГ СО РАН, 2011, 332 с.

Bastow T. P., Singh R. K., van Aarssen B. G. K., Alexander R., Kagi R. 2-Methylretene in sedimentary material: a new higher plant biomarker // [Organic Geochemistry](#), 2001, [v.32, I. 10](#), p. 1211-1217.

Bruvoll V., Kristoffersen Y., Coakley B.J., Hopper J.R., Planke S., Kandilarov A. [The nature of the acoustic basement on Mendeleev and northwestern Alpha ridges, Arctic Ocean](#) // *Tectonophysics*, 2012, v. 514-517, p. 123-145.

Peters, Walters, Moldowan, 2004 Peters K., Walters C., Moldowan J. The biomarker guide. Cambridge University Press, 364 p.

Gusev E., Rekant P., Kaminsky V., Krylov A., Morozov A., Shokalsky S., Kashubin S. Morphology of seamounts at the Mendeleev Rise, Arctic Ocean // *Polar Research*, 2017, v. 36, 1298901.

Petrova V., Batova G., Litvinenko I., Morgunova I. Organic matter in the Lomonosov Ridge Holocene-Pleistocene bottom sediments – biomarkers record. Book of Abstract. – 26th International Meeting on Organic Geochemistry (IMOG), 2013, v. 2, p. 275-276.

Radke M. Application of aromatic compounds as maturity indicators in source rocks and crude oils // *Marine and Petroleum Geology*, 1988, v. 5, p. 224-236.

Stein R., Matthiessen J., Niessen F., Krylov A., Nam S.-il and Bazhenova E. Towards a better (litho-) stratigraphy and reconstruction of Quaternary paleoenvironment in the Amerasian Basin (Arctic Ocean). // *Polarforschung*, 2009, v. 79 (2), p. 97 – 121.

[Yamamoto M., Okino T., Sugisaki S., Sakamoto T.](#) Late Pleistocene changes in terrestrial biomarkers in sediments from the central Arctic Ocean // *Organic geochemistry*, 2008, [v.39, I. 6](#), p. 754-763

Yamamoto M., Polyak L. Changes in terrestrial organic matter input to the Mendeleev Ridge, Arctic Ocean during the Late Quaternary // *Global and Planetary Change*, 2009, v. 68, p. 30-37.

Статья:

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

Моргунова

Углеводородные молекулярные маркеры как индикаторы особенностей позднекайнозойского осадконакопления на Амеразийской континентальной окраине (СЛО).

Подписи к рисункам:

Рисунок 1. Положение изученных осадочных колонок на батиметрической карте

Рисунок 2. Профиль 1, литолого-геохимическая характеристика осадочных отложений

Рисунок 3. Профиль 2, литолого-геохимическая характеристика осадочных отложений

Рисунок 4. Характеристика генетического типа и фациальных условий осадконакопления осадочных отложений

Рисунок 5. Геохимическая характеристика n-алканов и изопреноидов осадков ст. КД-03-10

Рисунок 6. Гопановые коэффициенты зрелости РОВ осадочных отложений

Рисунок 7. Стерановые коэффициенты зрелости РОВ осадочных отложений

Рисунок 8. Фациально-генетическая характеристика РОВ осадочных отложений по составу стеранов

Рисунок 9. Циклановые индексы, характеризующие генезис РОВ

Рисунок 10. Характеристика полиароматических УВ

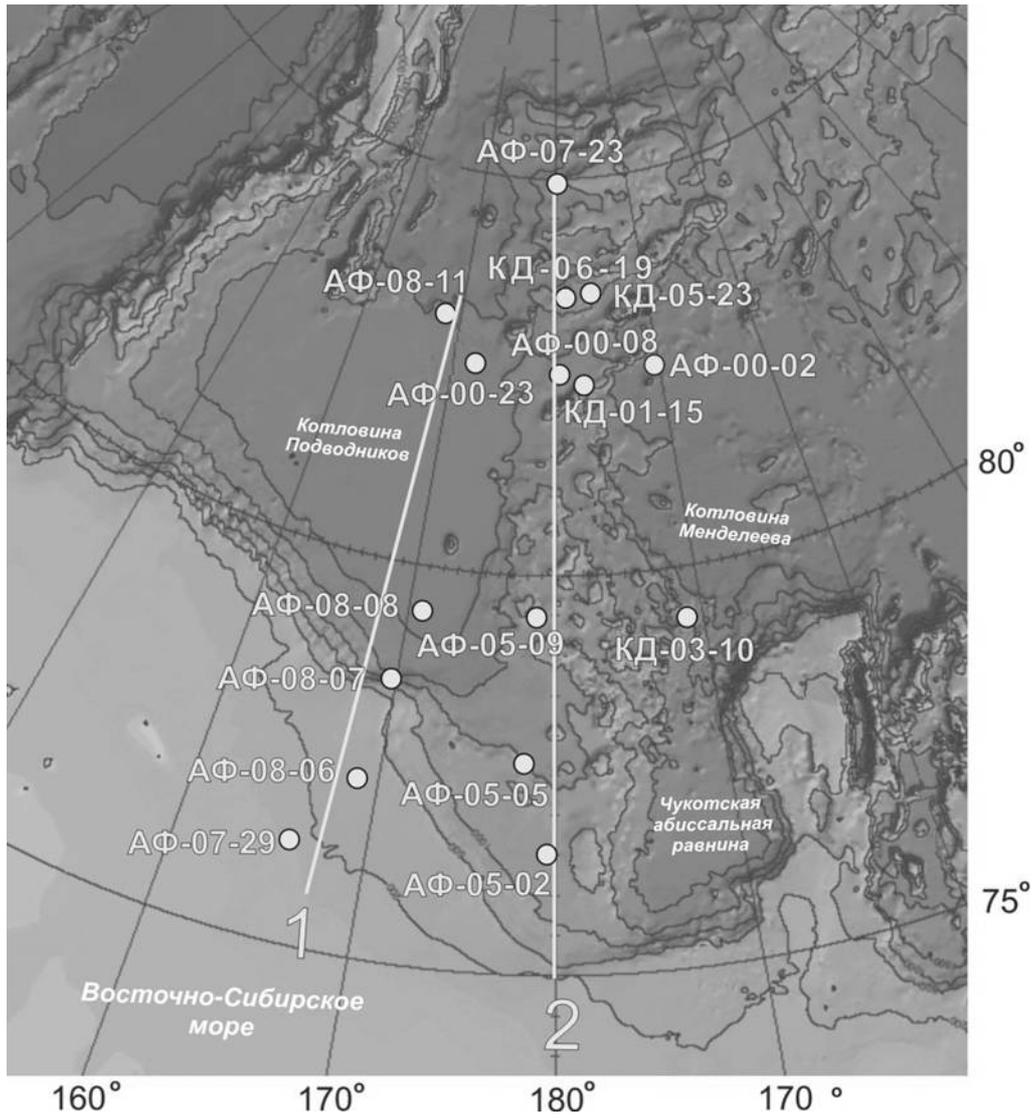
Рисунок 11. Геоморфологическая и литолого-геохимическая характеристика осадочного разреза ст. КД-06-19

Таблица 1. Профиль 1, характеристика n-алканов и изопреноидов

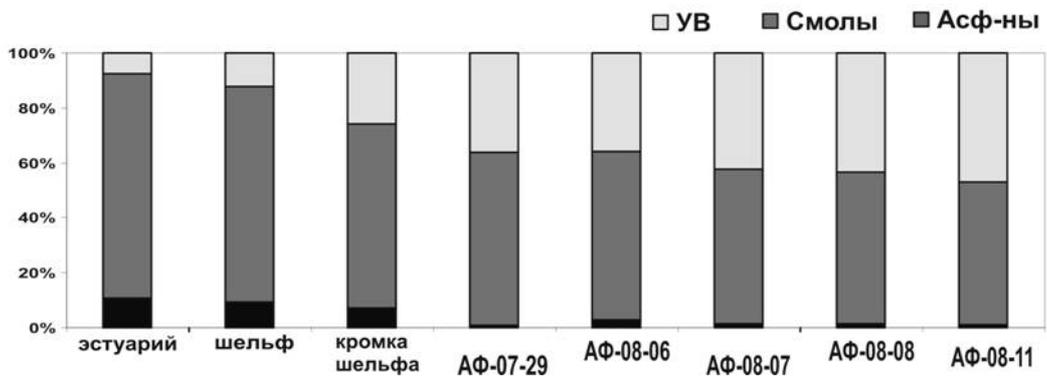
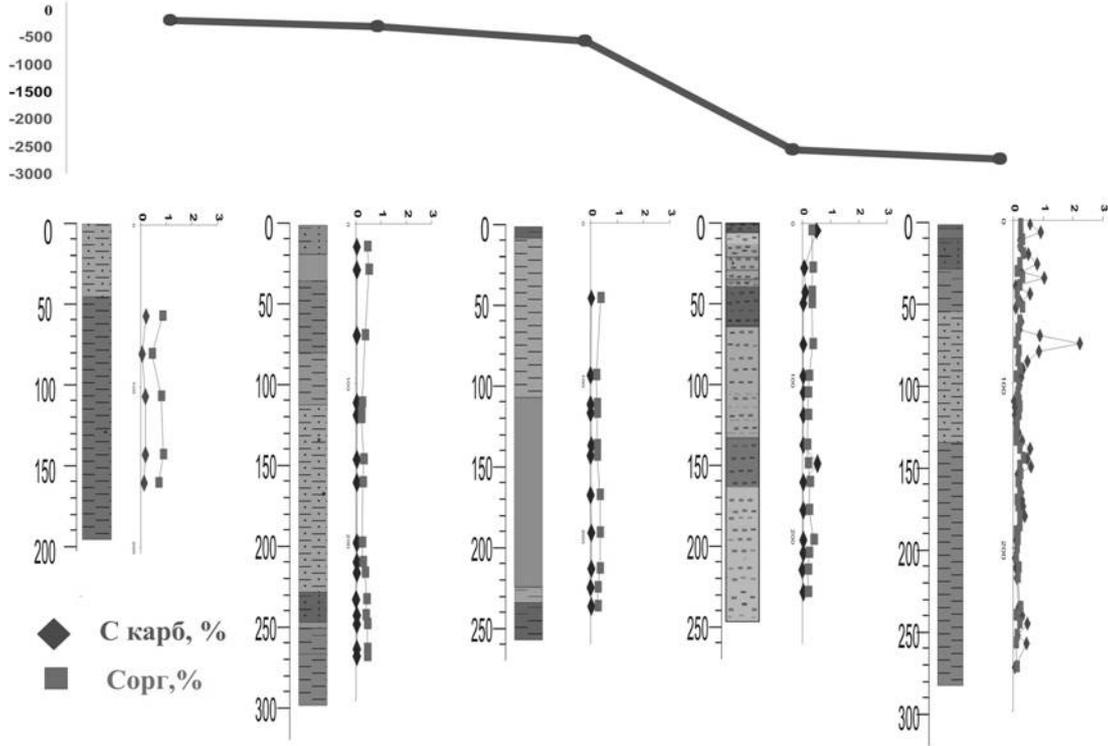
№ станции	CPI₂₃₋₃₃	C17/ C27	OEP₁₇₋₁₉	OEP₂₇₋₃₁	Pr/Ph	Kiso	Lithic/Σn-alk
АФ-07-29	2,98	0,33	1,30	4,11	0,81	0,47	0,32
АФ-08-06	2,39	0,67	0,81	4,65	0,89	0,32	0,22
АФ-08-07	2,14	0,86	0,71	3,78	0,84	0,35	0,48
АФ-08-08	2,38	0,58	0,74	4,70	0,95	0,37	0,39
АФ-08-11	1,84	0,96	0,49	3,98	1,08	0,41	0,57

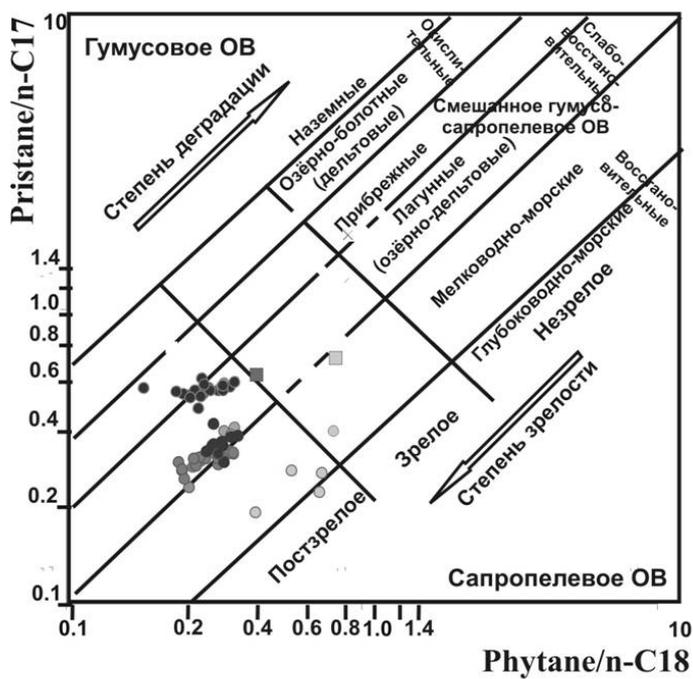
Таблица 2. Профиль 2, характеристика н-алканов и изопреноидов

№ станции	CPI ²³⁻³³	C17/C27	OEP ¹⁷⁻¹⁹	OEP ²⁷⁻³¹	Pr/Ph	Kiso	Lithic/ Σ n-alk
АФ-05-02	2,14	1,12	0,59	4,05	0,88	0,63	0,48
АФ-05-05	1,94	1,49	1,03	3,36	0,82	0,64	0,42
АФ-05-09	1,52	0,92	1,20	2,33	0,95	0,76	0,39
КД-03-10	1,07	0,88	0,59	1,47	0,90	0,63	0,89
КД-01-15	1,44	0,51	0,69	1,92	0,92	0,71	0,66
КД-05-23	2,22	0,27	0,64	3,40	1,00	0,56	0,44
КД-06-19	2,09	0,48	1,16	3,25	0,76	0,79	0,50



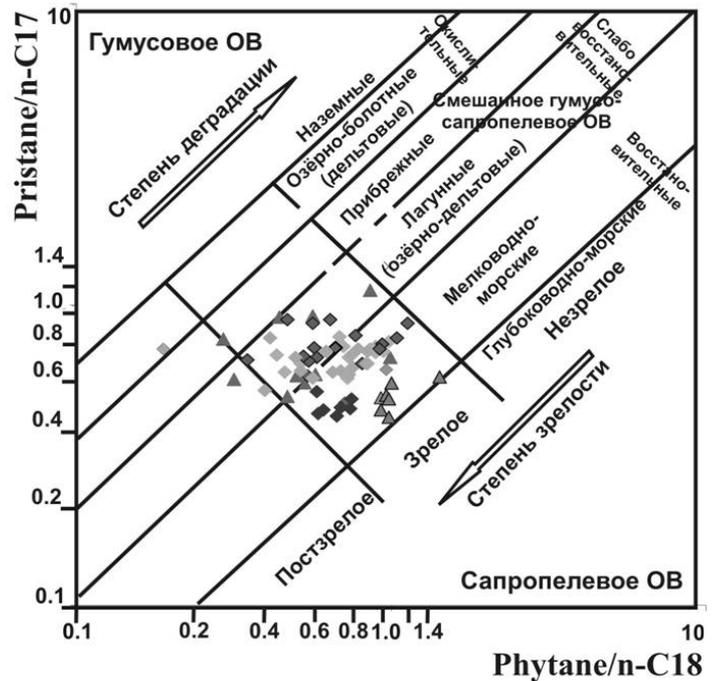
АФ-07-29	АФ-08-06	АФ-08-07	АФ-08-08	АФ-08-11
N 79,36 E 161,42 192 m	N 77,02 E 169,36 298 m	N 78,00 E 170,09 565 m	N 79,07 E 172,04 2558 m	N 83,00 E 169,36 2740 m





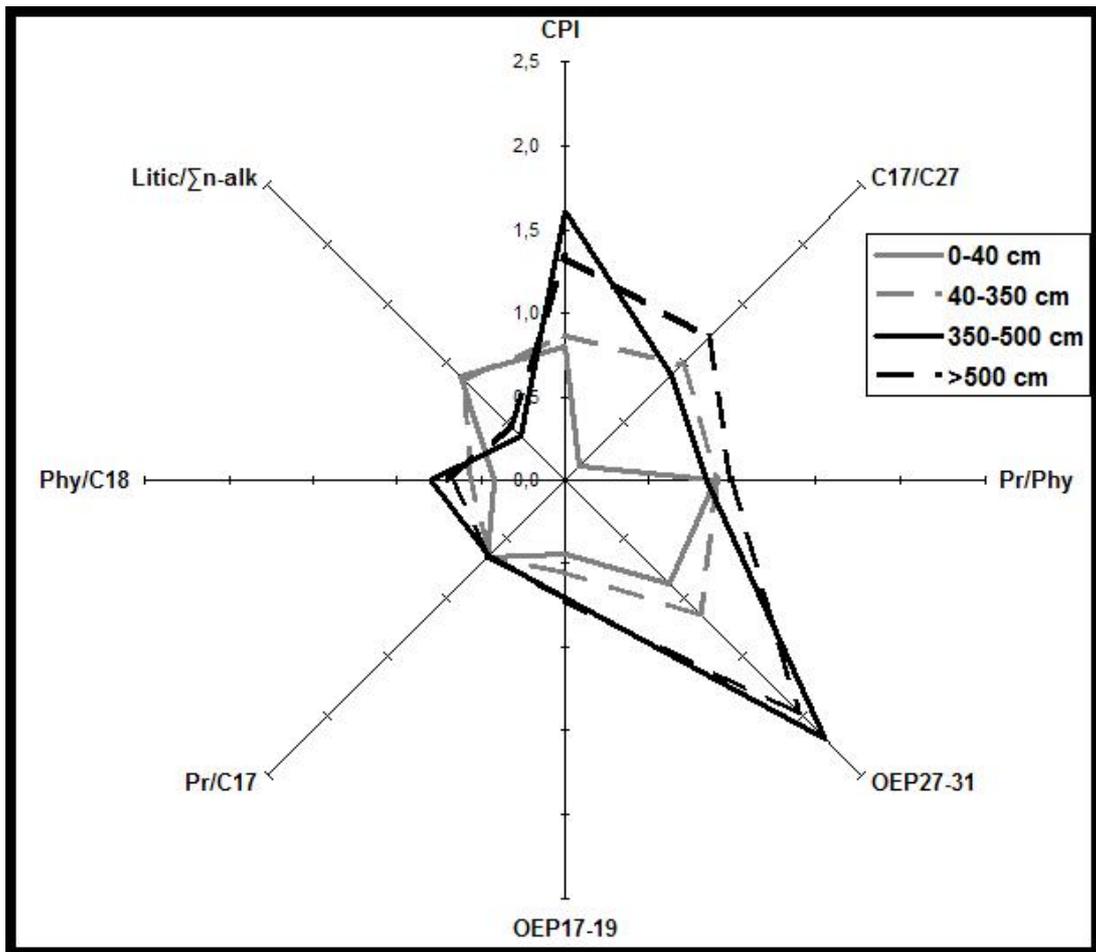
Профиль 1

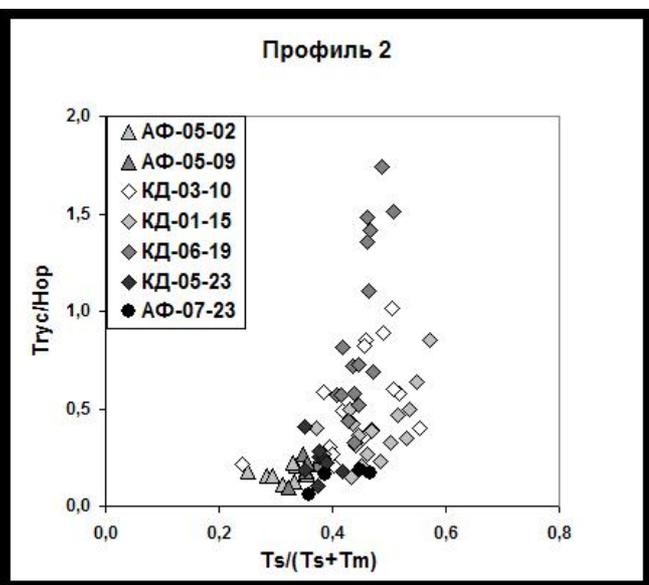
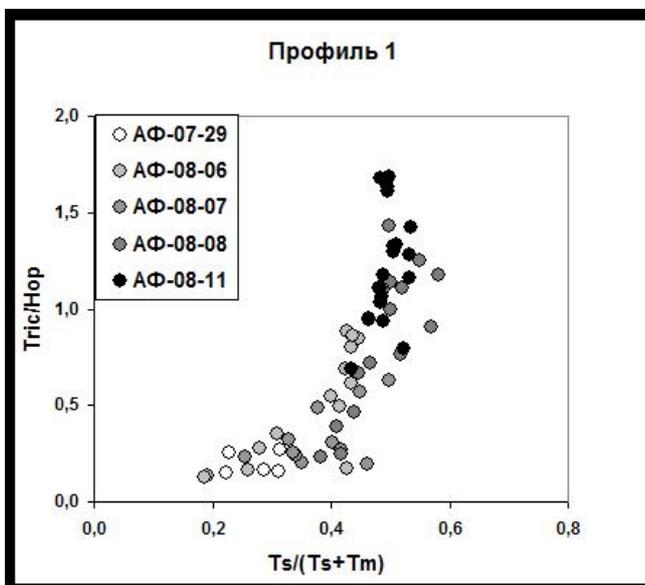
- | | |
|------------|------------|
| □ эстуарий | ■ шельф |
| ○ АФ-07-29 | ● АФ-08-07 |
| ● АФ-08-06 | ● АФ-08-08 |
| | ● АФ-08-11 |

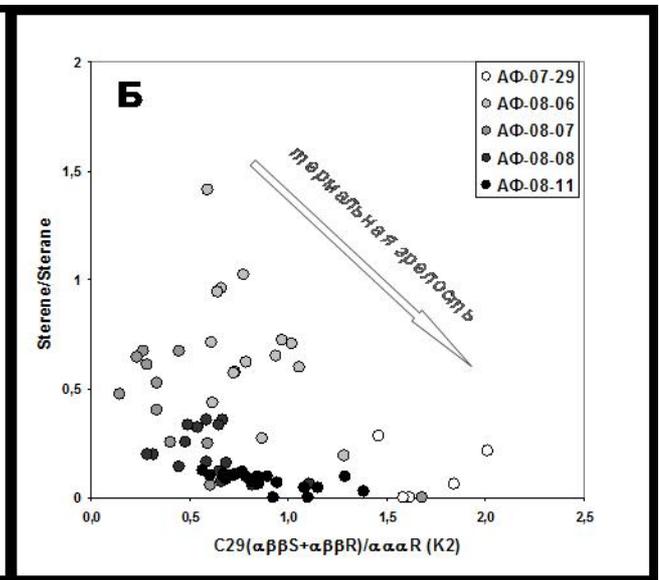
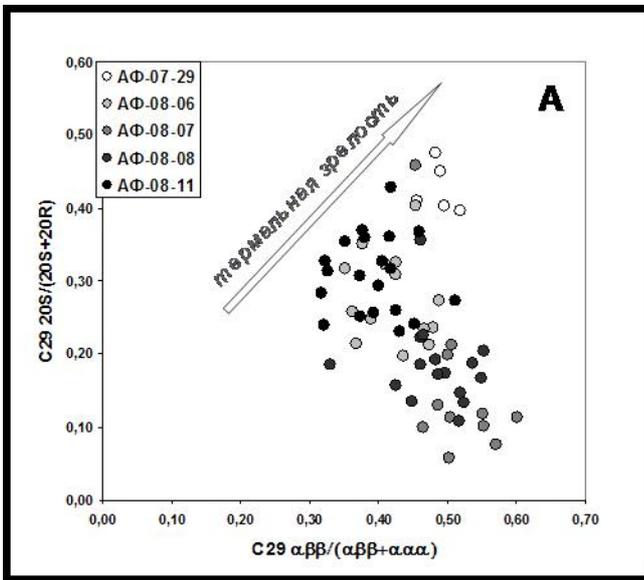


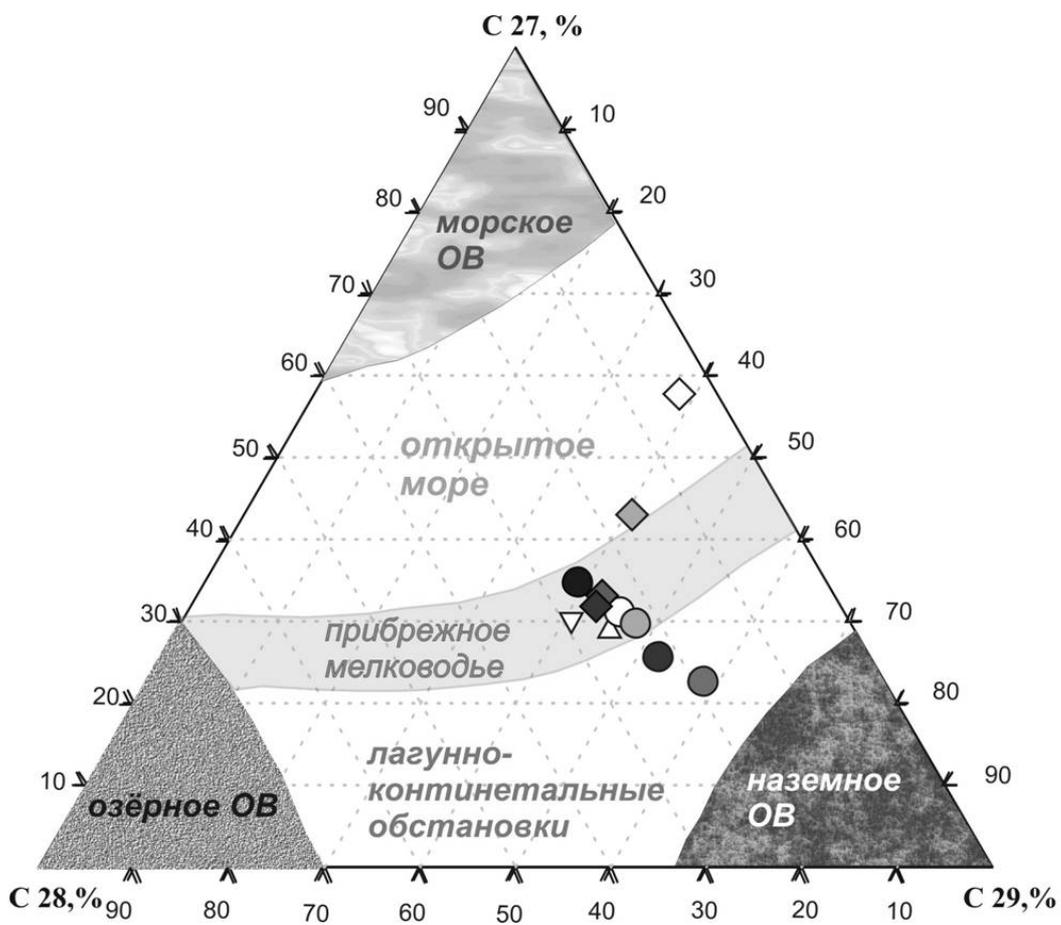
Профиль 2

- | | |
|------------|------------|
| ▲ АФ-05-02 | ◆ КД-01-15 |
| ▲ АФ-05-09 | ◆ КД-06-19 |
| ◆ КД-03-10 | ◆ КД-05-23 |









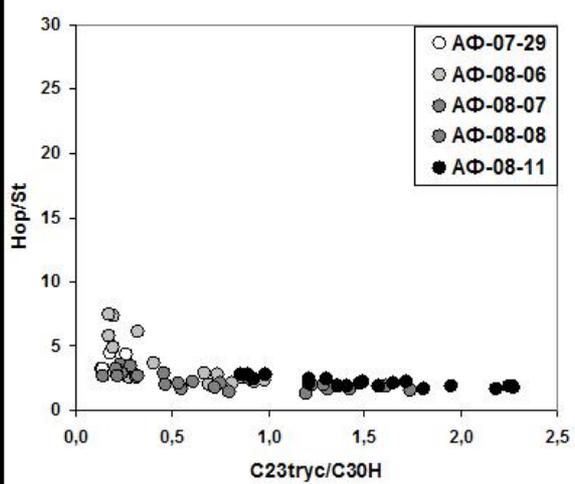
Профиль 1

- АФ-07-29
- АФ-08-06
- АФ-08-07
- АФ-08-08
- АФ-08-11

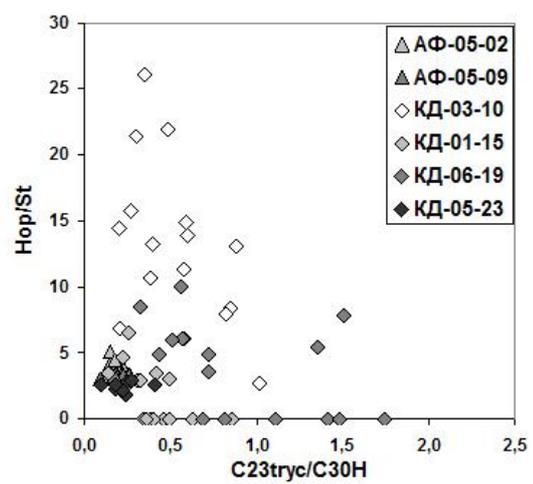
Профиль 2

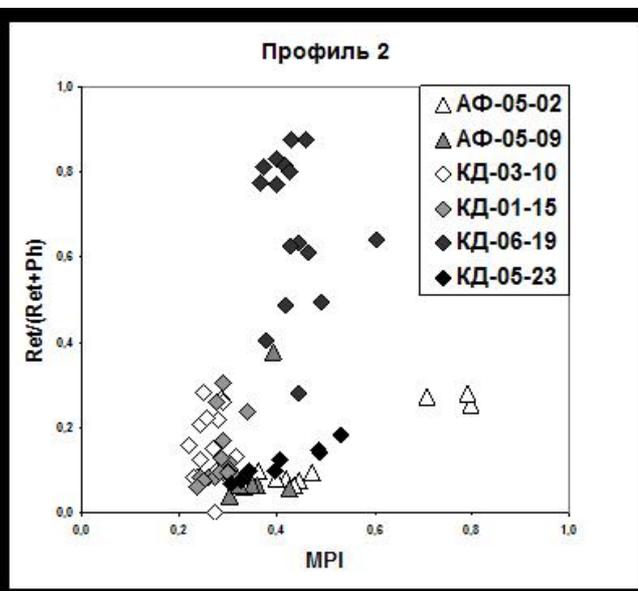
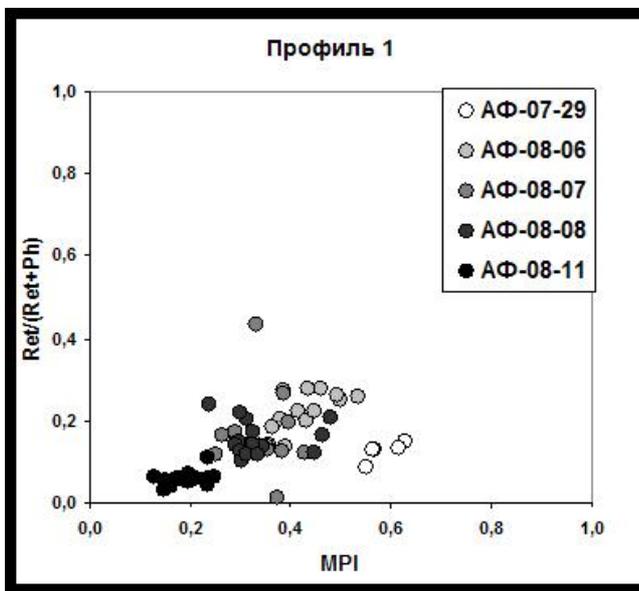
- △ АФ-05-02
- ▲ АФ-05-09
- ▽ АФ-00-02
- ▽ АФ-00-08
- ◇ КД-03-10
- ◇ КД-01-15
- ◆ КД-05-23
- ◆ КД-06-19

Профиль1



Профиль2





КД-06-19

N 83,05 W 175,47
2350 m

◆ n-C23-33 lit/ Σ n-C13-C33 Масс-хроматограммы
■ Reth/(Ph+Ret) феноантронов
▲ >0,063мкм/50 (m/z 178,192,206,220,234)

Фрагмент сейсмического
профиля МОВ-ОГТ ARC1205
(Gusev et al., 2017)

