

УГЛЕВОДОРОДНЫЕ МОЛЕКУЛЯРНЫЕ МАРКЕРЫ КАК ИНДИКАТОРЫ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОЗДНЕКАЙНОЗОЙСКОГО ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ НА АМЕРАЗИЙСКОЙ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ОКРАИНЕ (*Северный Ледовитый океан*)

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

ВНИИОкеангеология, 190121, Санкт-Петербург, Английский просп., 1, Россия

На основе геоморфологической, литологической и органогеохимической характеристик исследовались основные факторы, контролирующие формирование в позднем кайнозое рыхлых осадочных отложений поднятия Менделеева и прилегающей части Северного Ледовитого океана. Анализ группового и молекулярного состава рассеянного органического вещества (РОВ) осадков, отобранных в ходе научно-исследовательских рейсов НИС «Академик Федоров» (2000, 2005, 2007 гг.) 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, обогащенного 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 определенную роль играют процессы субаквального размыва и переотложения продуктов денудации коренных пород и доголоценовых осадочных образований.

Донные отложения, рассеянное органическое вещество, биомаркеры, Северный Ледовитый океан, восточно-арктический шельф.

HYDROCARBON MOLECULAR MARKERS AS INDICATORS OF THE LATE CENOZOIC SEDIMENTATION ON THE AMERASIAN CONTINENTAL MARGIN (*Arctic Ocean*)

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

The main factors controlling the bulk sedimentation in the region of the Mendeleev Rise and the adjacent part of the Arctic Ocean during the late Cenozoic were studied using a complex of geomorphological, lithological, and organic geochemical data. Samples for the study were collected during the cruises of the R/V Akademik Fedorov in 2000, 2005, and 2007 and the icebreaker Kapitan Dranitsyn in 2012. Analysis of the group and molecular compositions of the dispersed organic matter (DOM) in bottom sediments has shown that the input of terrigenous sediments enriched with 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 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. Subaqueous erosion and redeposition of denudation products of source rocks and pre-Holocene sediments play an important part in sedimentation together with a terrigenous flow and ice transport.

Bottom sediments, dispersed organic matter, biomarkers, Arctic Ocean, East Arctic shelf

ВВЕДЕНИЕ

Глубоководная часть Северного Ледовитого океана 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 [Stein et al., 2009; Yamamoto, Polyak, 2009], состав рассеянного органического вещества (РОВ) осадочных отложений рыхлого чехла глубоководной части Американо-Азиатской 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 термальное-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 мезокайнозойского возраста. Однако на двух сейсмических профилях, выполненных с борта ледокола «HEALY», акустический фундамент подходит непосредственно к поверхности морского дна [Bruvold 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 осадочных отложений с целью выявления источников поступления и условий формирования рыхлых отложений Американо-Сибирской континентальной окраины.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом исследования послужили осадочные колонки, отобранные в ходе экспедиционных работ НИС «Академик Федоров» (2000, 2005, 2007, 2008 гг.) и ледокола «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 °С. Аналитическая процедура изучения РОВ включала: определение элементного состава — карбонатного ($C_{\text{карб.}}$) и органического ($C_{\text{орг.}}$) углерода, экстракцию битумоидов, определение их группового состава, хроматографическое выделение фракций насыщенных и ароматических углеводородов (УВ) с последующим их исследованием методом ГХ-МС на комплексе Agilent Technologies 5973/6850 с квадрупольным масс-детектором и программным пакетом обработки аналитической информации [Петрова и др., 2010, 2017].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Профиль 1 берет 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 ее северной границы (АФ-08-11) [Арктический бассейн..., 2017].

Осадочные колонки (до 300 см) представлены преимущественно бескарбонатными алевропелитами с невысоким содержанием органического углерода ($C_{\text{орг.}} = 0.3—0.8\%$) (рис. 2). Максимальное содержание $C_{\text{орг.}}$ наблюдалось в осадках колонки АФ-07-29, минимальное — в абиссальных осадках АФ-08-11, характеризующихся также несистематическими вариациями содержания $C_{\text{карб.}}$ (от 0.05 до 1.34%), не отмеченными в осадочных разрезах континентального склона и его подножия.

Групповой состав РОВ (битумоиды, гуминовые кислоты и нерастворимые компоненты) свидетельствует о значительном уровне его трансформации (остаточного органического вещества (ООВ > 90 %)). При этом наибольшим уровнем преобразования (ООВ = 97.2 %) отличаются отложе-

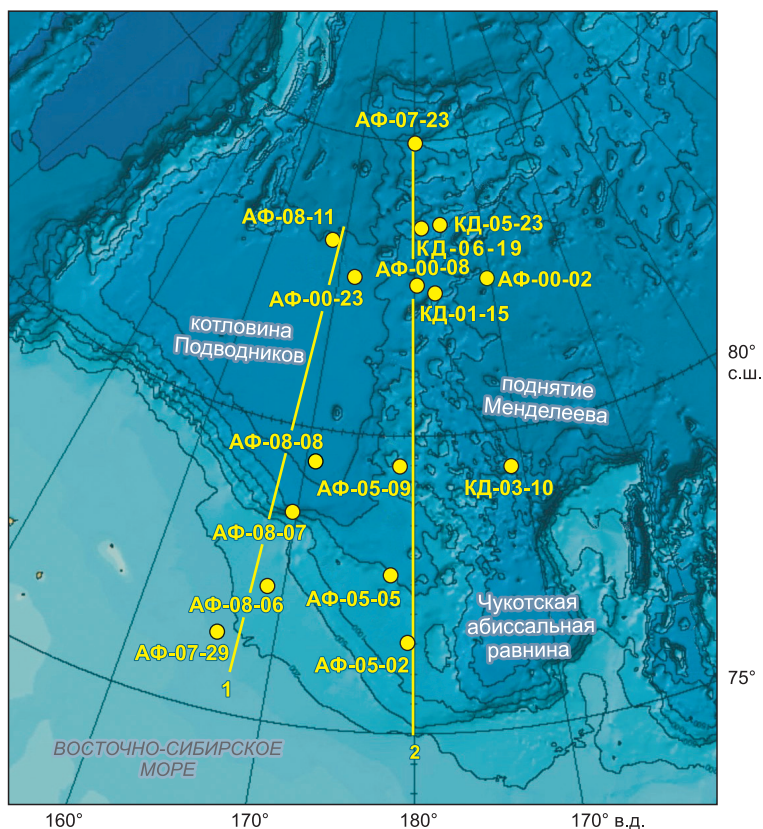


Рис. 1. Положение изученных осадочных колонок на батиметрической карте.

1 — профиль, 2 — станция проотбора.



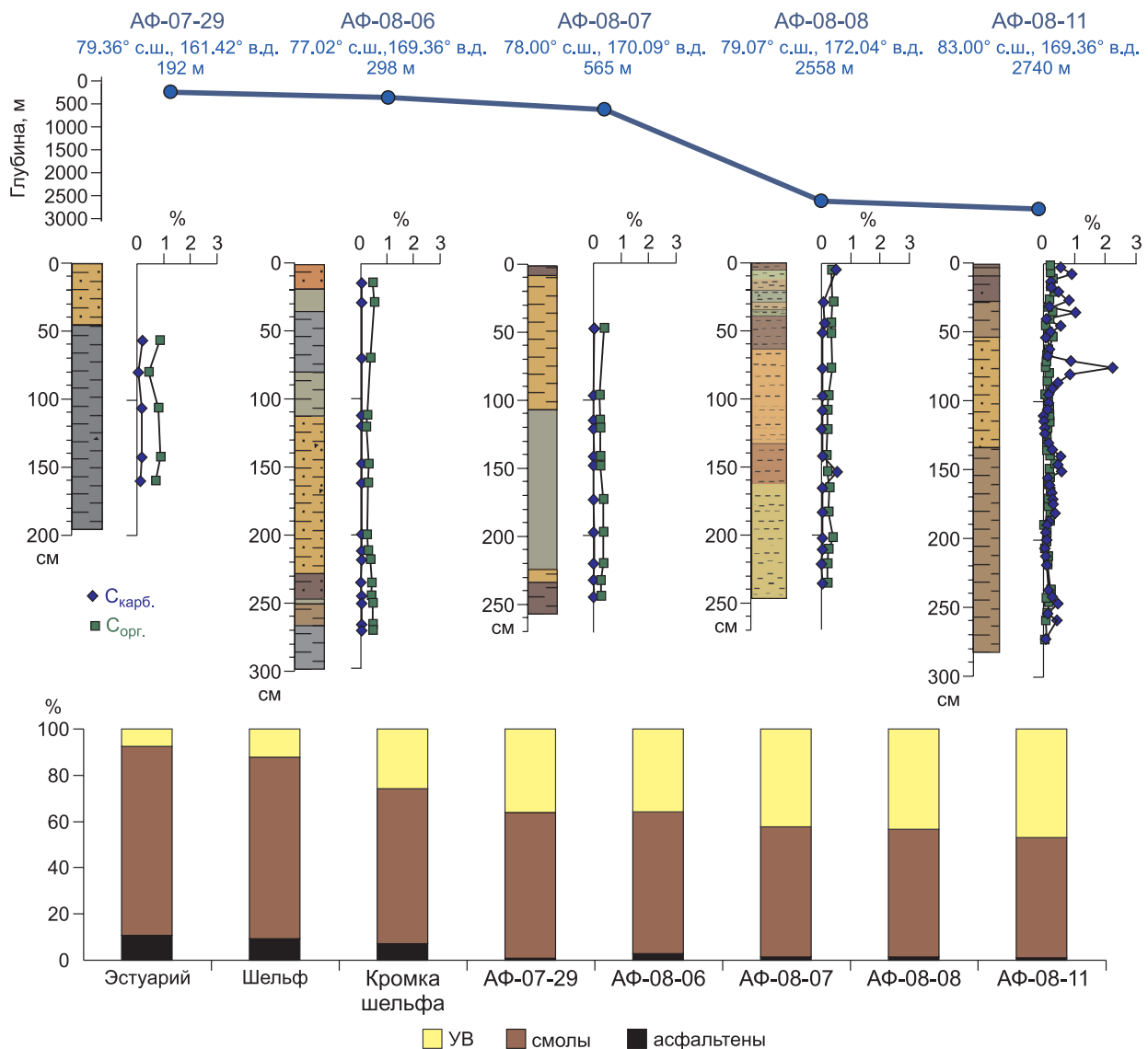


Рис. 2. Профиль 1, литолого-геохимическая характеристика осадочных отложений [Рекант и др., 2016].

ния 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 (смол и асфальтенов) и возрастает содержание углеводородов (см. 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 алевролитистыми 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 ($C_{\text{карб.}} < 0.1\%$) тонкозернистыми разностями с невысоким содержанием $C_{\text{орг.}}$ ($< 0.5\%$) (см. рис. 3). Однако уже в зоне южного

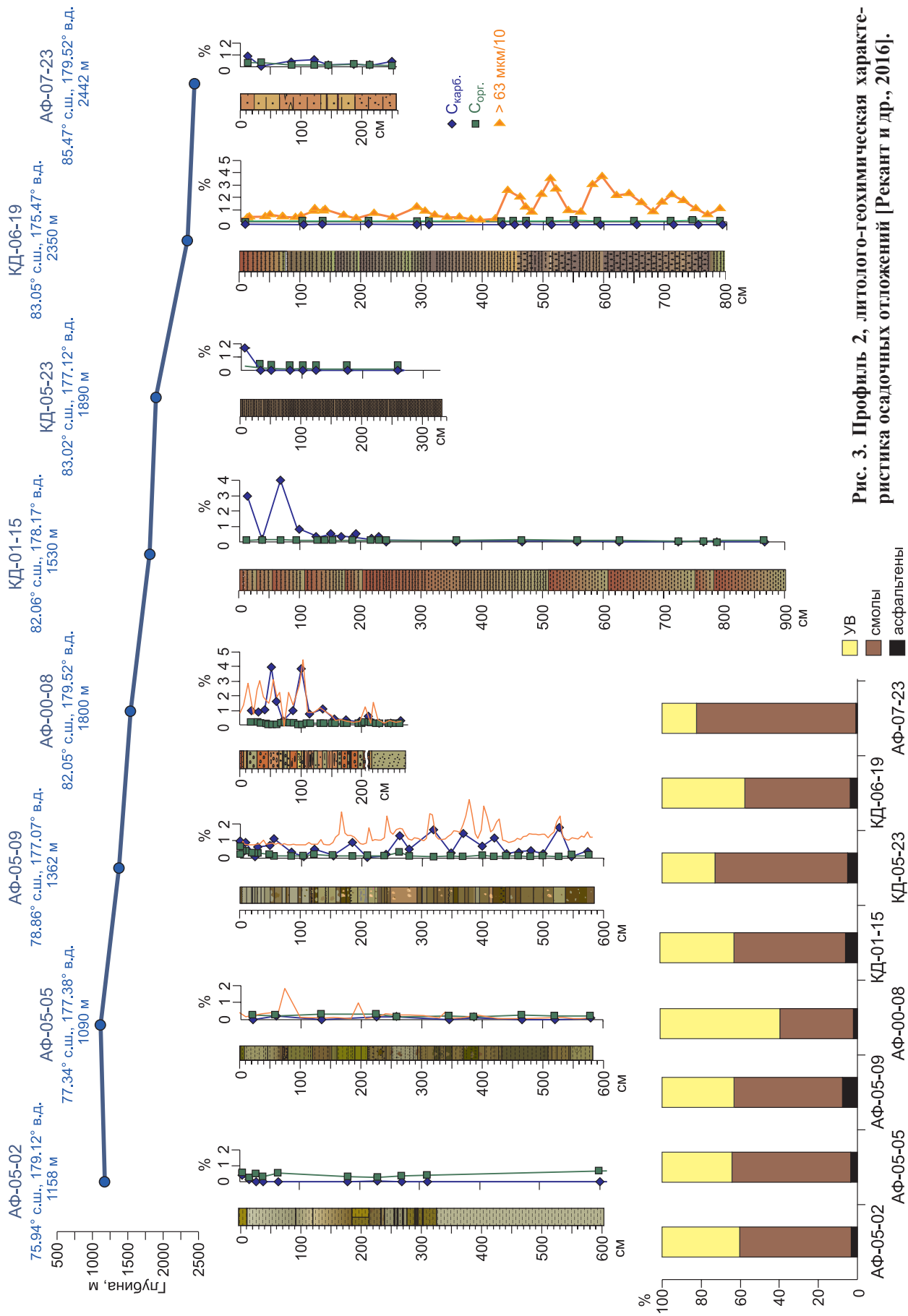


Рис. 3. Профиль 2, литолого-геохимическая характеристика осадочных отложений [Рекант и др., 2016].

склона поднятия Менделеева (АФ-05-09) среднее содержание $C_{\text{карб.}}$ заметно возрастает (до 0.6 %), а его распределение по разрезу варьирует от 0.04 до 1.75 %. При этом максимумы содержания $C_{\text{карб.}}$, наблюдаемые по всему осадочному разрезу (600 см), лишь в нижней части разреза коррелируют с содержанием грубозернистой фракции (> 63 мкм) (см. рис. 3). Таким образом, обусловленность повышенных содержаний карбонатов материалом ледового разнота 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.) вкосте простирания поднятия Менделеева, наличие этих прослоев более характерно для его восточного склона (колонка PS72/340-5). Аналогичная тенденция наблюдается и в более высокоширотных осадочных отложениях (80° с.ш.). Сопоставление распределения $C_{\text{карб.}}$ и грубозернистой фракции в осадках западного подножия (АФ-00-23), центральной части (АФ-00-08) и восточного подножия (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 $C_{\text{карб.}}$ резко снижается, а корреляция с грубозернистой фракцией отсутствует.

Наиболее высокие содержания $C_{\text{карб.}}$ (до 4 %), которые могут быть соотнесены с «розовыми» прослоями, наблюдались в отложениях, отобранных в вершинной части г. Шамшура (АФ-00-08, КД-01-15) (см. рис. 3) и на восточном борту поднятия Менделеева, к юго-востоку от плато Почтарева [Гусев и др., 2013] (КД-03-10). Однако, если в осадках колонки АФ-00-08 содержание $C_{\text{карб.}}$ отчетливо коррелирует с содержанием грубозернистой фракции (см. 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 содержания доломитов, обломков карбонатной органики [Рекант и др., 2013] и, соответственно, $C_{\text{карб.}}$, содержание грубозернистой фракции незначительно (менее 10 %). Попытка корреляции данного осадочного разреза с разрезами, описанными ранее (HLY0503-08JPC [Yamamoto, Polyak, 2008], PS72/404-3 [Stein et al., 2009]), выглядит неубедительно, поскольку стратификация, представленная этими авторами, весьма различается, несмотря на близость расположения точек проб-отбора. 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 палеорекострукций 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. Трушкина, 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 ($C_{\text{карб.}} < 0.1$ %) алевропелитами с содержанием $C_{\text{орг.}} < 0.2$ %, корреляции содержания $C_{\text{карб.}}$ и гранулометрической фракции > 63 мкм не наблюдается. Групповой состав РОВ (ООВ до 98 %) и его растворимых компонентов — битумоидов (УВ, смолы и асфальтены; см. рис. 3) свидетельствует 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 сапропелево-гумусовом генезисе РОВ, сформированном в прибрежных и мелководно-морских условиях. Это наглядно отражает диаграмма Кеннона—Кессоу [Connon, Cassou, 1980] (рис. 4).

Характерное для РОВ смешанного типа бимодальное распределение *n*-алканов (табл. 1) с максимумами в низкомолекулярной (*n*- C_{17-19}) и высокомолекулярной (*n*- C_{25-31}) областях соответствует вкладу аквагенной и терригенной составляющих при закономерном снижении роли последней в мористом направлении (*n*- C_{17}/n - C_{27} от 0.33 до 0.96) (см. табл. 1). В этом же направлении возрастает уровень трансформации РОВ, на что указывает снижение индексов нечетности (СРІ и ОЕР), а также увеличение от-

Таблица 1.

Профиль 1, характеристика *n*-алканов и изопреноидов

№ станции	CPI ₂₃₋₃₃	<i>n</i> -C ₁₇ / <i>n</i> -C ₂₇	OEP ₁₇₋₁₉	OEP ₂₇₋₃₁	Pr/Phy	<i>K</i> _{iso}	Lithic <i>n</i> -alk/Σ <i>n</i> -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

Примечание. Здесь и в табл. 2: *K*_{iso} — изопреноидный коэффициент (Pr + Phy)/(*n*-C₁₇+*n*-C₁₈), где Pr — пристан, Phy — фитан.

носительного содержания литифицированных (термально-зрелых) алифатических УВ (Lithic *n*-alk/Σ*n*-alk) [Yamamoto, Polyak, 2009]. Наблюдаемое в осадочном разрезе колонки АФ-08-11 относительное увеличение содержания компонентов аквагенного РОВ (*n*-C₁₇/*n*-C₂₇ = 0.96) может быть обусловлено привнесением карбонатного осадочного материала как дрейфового, так и переотложенного. В целом аналогии характера распределения *n*-алканов в поверхностных и погруженных (до 300 см) осадках свидетельствуют о стабильности условий позднечетвертичного осадконакопления.

Геохимические параметры, характеризующие состав алифатических углеводородов (*n*-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 *n*-алканов и изопреноидов в этих осадках не наблюдается. На диаграмме Кеннона—Кессоу (см. рис. 4) размытое поле точек, характеризующее всю совокупность изученных осадков, отражает многообразие уровня их термальной зрелости, генезиса и условий осадконакопления. Так, максимальное содержание аквагенных компонентов свойственно осадкам 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), типичные для РОВ постдиагенетического уровня зрелости, в сочетании с высоким содержанием литифицированных *n*-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 составляют не более 1.5 мм/тыс. лет. Соответственно, возраст нижней части разреза определен как плиоценовый (3.58 млн лет). При этом авторы выделяют три интервала, характеризующиеся прямой и обратной полярностями геомагнитного поля: 531.0—394.5, 394.5—123.5, < 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, позволяет выделить три принципиально отличающихся совокупности (рис. 5). Осадки нижней части разреза (> 350 см) содержат близкое по составу и уровню трансформации РОВ гумусово-сапропелевого генезиса (*n*-C₁₇/*n*-C₂₇ = 0.9—1.2; CPI = 1.3—1.6; Lithic *n*-alk/Σ*n*-alk = 0.3—0.5). Обильное поступление в осадочный бассейн

Таблица 2.

Профиль 2, характеристика *n*-алканов и изопреноидов

№ станции	CPI ₂₃₋₃₃	<i>n</i> -C ₁₇ / <i>n</i> -C ₂₇	OEP ₁₇₋₁₉	OEP ₂₇₋₃₁	Pr/Phy	<i>K</i> _{iso}	Lithic <i>n</i> -alk/Σ <i>n</i> -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

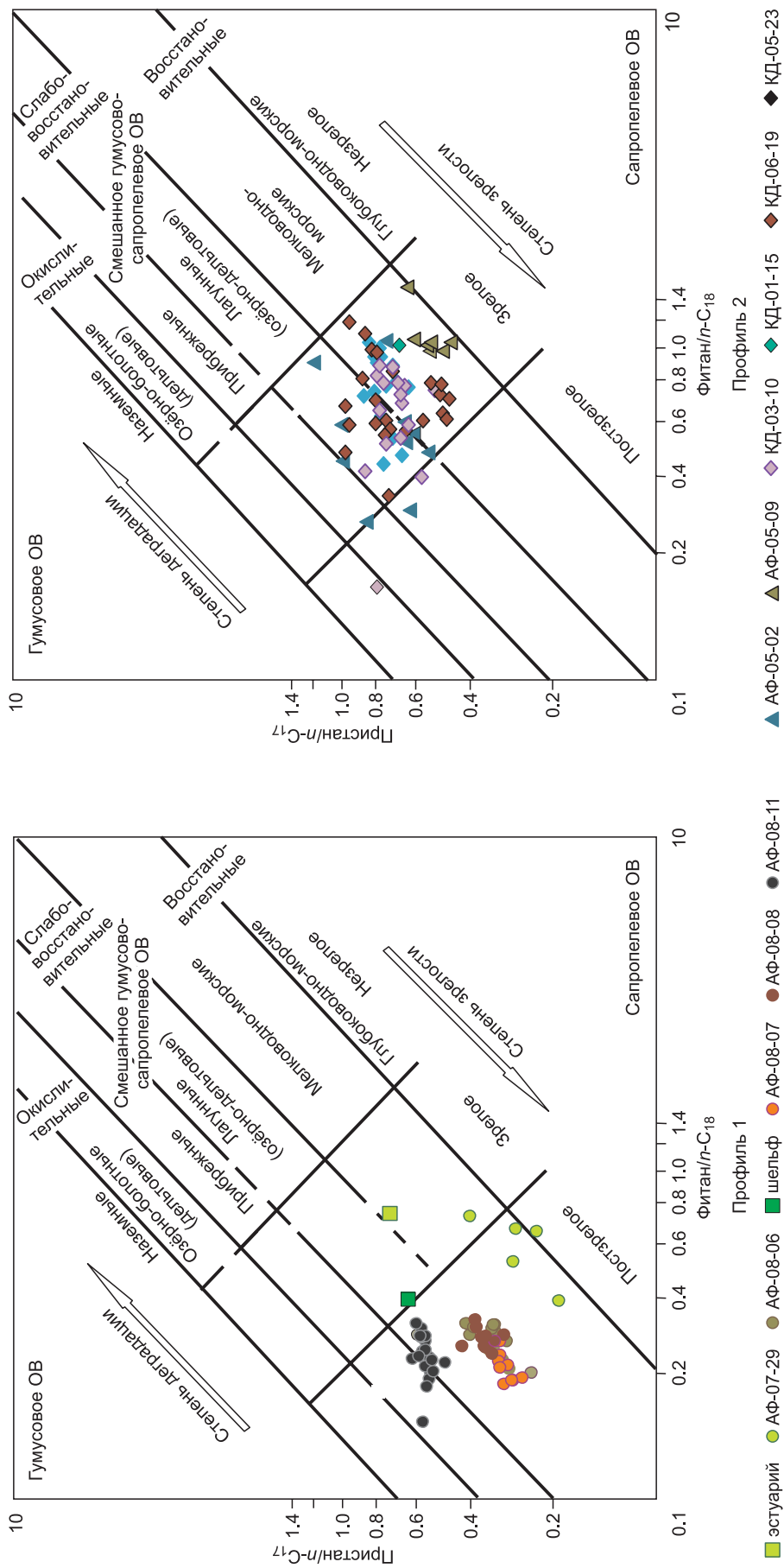
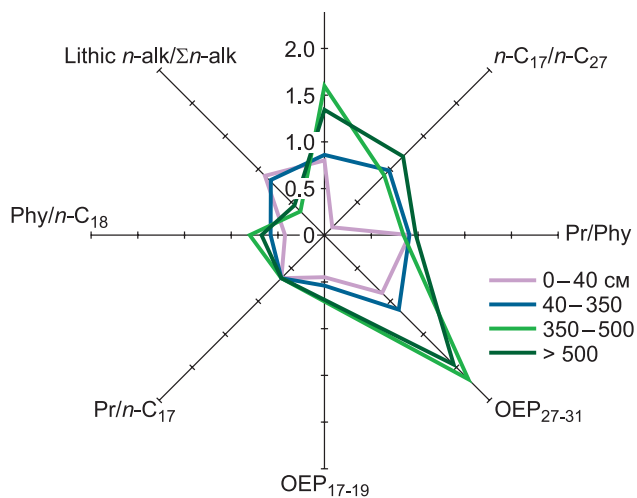


Рис. 4. Характеристика генетического типа и фациальных условий осадконакопления осадочных отложений.

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



слабопреобразованного ОВ со значительным вкладом аквагенной биоты вполне согласуется с представлением о климатическом оптимуме. Вверх по разрезу (< 350 см) увеличивается содержание термально-зрелого РОВ ($\text{CPI} = 0.8\text{—}0.9$; $\text{Lithic } n\text{-alk} / \sum n\text{-alk} = 0.8\text{—}0.9$), что может быть обусловлено как терригенным стоком продуктов 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 ($n\text{-C}_{17}/n\text{-C}_{27} = 0.13$) при аномальном доминировании четных компонентов ($\text{OEP}_{17-19} = 0.44$).

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 ст. 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 гидротермальном — верхнего. Еще 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 HLY 0521 из работы [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 ($n\text{-C}_{17}/n\text{-C}_{27} = 0.3\text{—}0.5$), 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 — терпанов 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 трициклических терпанов $\text{C}_{19}\text{—}\text{C}_{29}$ ($\sum \text{Трицикланов} / \sum \alpha\beta, \beta\text{h гопанов}$), с одной стороны, может быть признаком доминирования в составе исходного ОВ эукариот [Конторович и др., 2009], что сомнительно, исходя из общей тенденции снижения содержания гумусового ОВ в мористом направлении. В то же время известно, что трицикланы обладают большей термодинамической стабильностью, чем гопаны [Peters et al., 2004] и, соответственно, лучшей сохранностью в ходе трансформации РОВ. Прямая корреляция трицикланового индекса с другим показателем термальной зрелости — трисноргопановым индексом $\text{Ts}/(\text{Ts}+\text{Tm})$, достигающим в изученных осадках значений, типичных 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 трисноргопановый индекс зрелости ниже для сапропелевого органического вещества, чем терригенного [Фомин, 2011].

Стерановые коэффициенты зрелости, являющиеся индикаторами катагенных изменений РОВ, основаны на соотношении биоэпимеров ($\alpha\alpha\alpha\text{R}$) и более термодинамически устойчивых геоэпимеров ($\alpha\beta\beta\text{R}$ и $\alpha\beta\beta\text{S}$) [Peters et al., 2004]. Информативность стерановых коэффициентов ограничена термодинамическим пределом изомеризации, достигаемым на стадии катагенеза MK_2 .

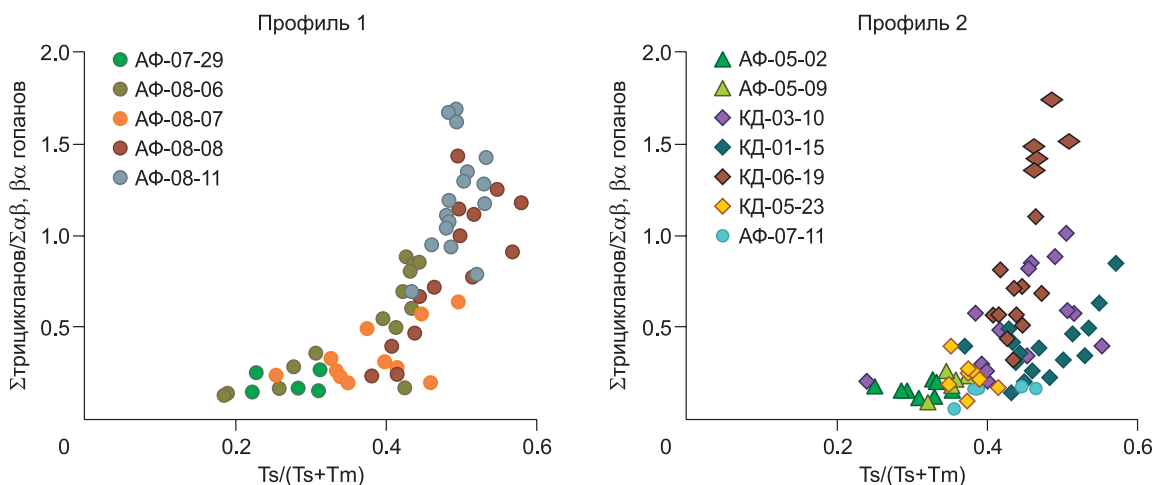


Рис. 6. Гопановые коэффициенты зрелости РОВ осадочных отложений.

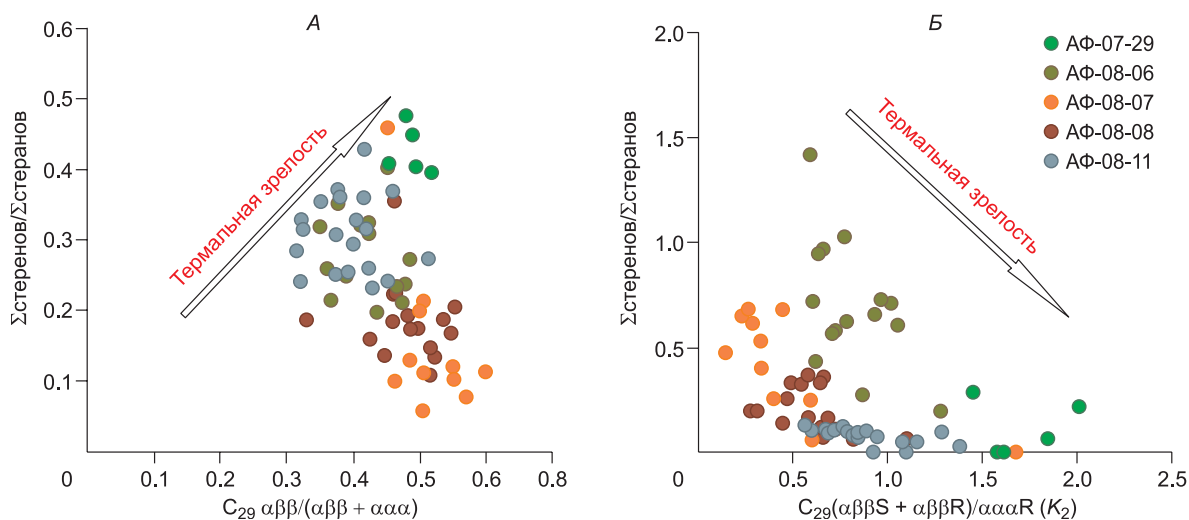


Рис. 7. Стерановые коэффициенты зрелости РОВ осадочных отложений.

А, Б — описание см. в тексте.

На рисунке 7, А 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) частей профиля, что согласуется с параметрами других групп молекулярных маркеров. Еще одним показателем, позволяющим оценить уровень преобразования РОВ, является соотношение содержания в осадках геостеранов и их биогенных предшественников — стеренов (олеанена и фридоолеанена), типичных 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 (см. рис. 7, Б) 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 K_2 .

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 C_{27} — C_{29} — 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 континен-

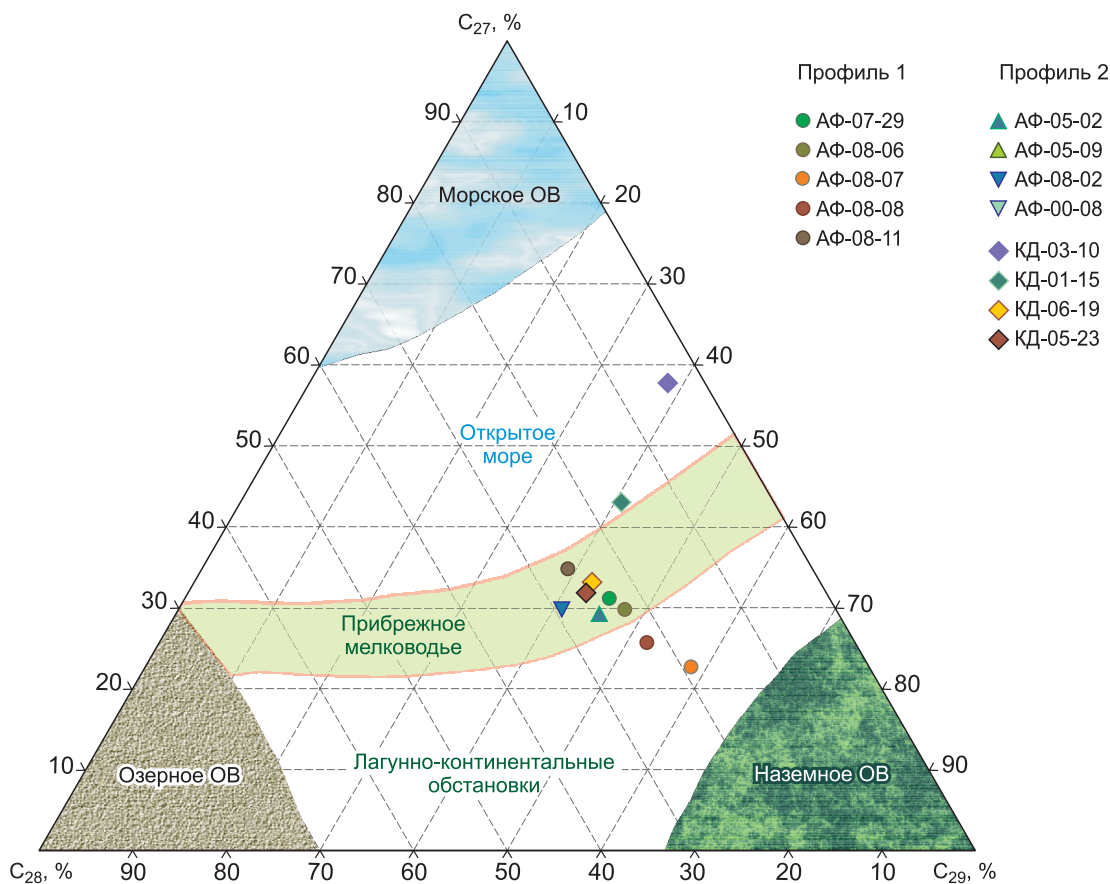


Рис. 8. Фациально-генетическая характеристика РОВ осадочных отложений по составу стеранов.

тального 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 (*n*-алканов, изопреноидов, терпанов) и еще раз подчеркивает 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 типично повышенное содержание стеранов и трициклана C_{23} (T_{23} , рис. 9). Для РОВ осадков профиля 2 значение этих показателей еще раз подчеркивает неоднородность их генезиса. Так, осадкам ст. КД-03-10 свойственно исключительно высокое содержание молекулярных таксонов прокариот (Σ гопанов/ Σ стеранов 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 et al., 2004]. Одним из таких показателей является метилфенантеновый индекс (МПИ), 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_{Vr}°) [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 МПИ характеризуются осадки самой северной станции АФ-08-11. Этот парадоксальный факт обусловлен, очевидно, спецификой минерального состава осадков — обогащенностью карбонатами, что кардинально снижает значения данного показателя [Peters et al., 2004]. Максимальным уровнем тер-

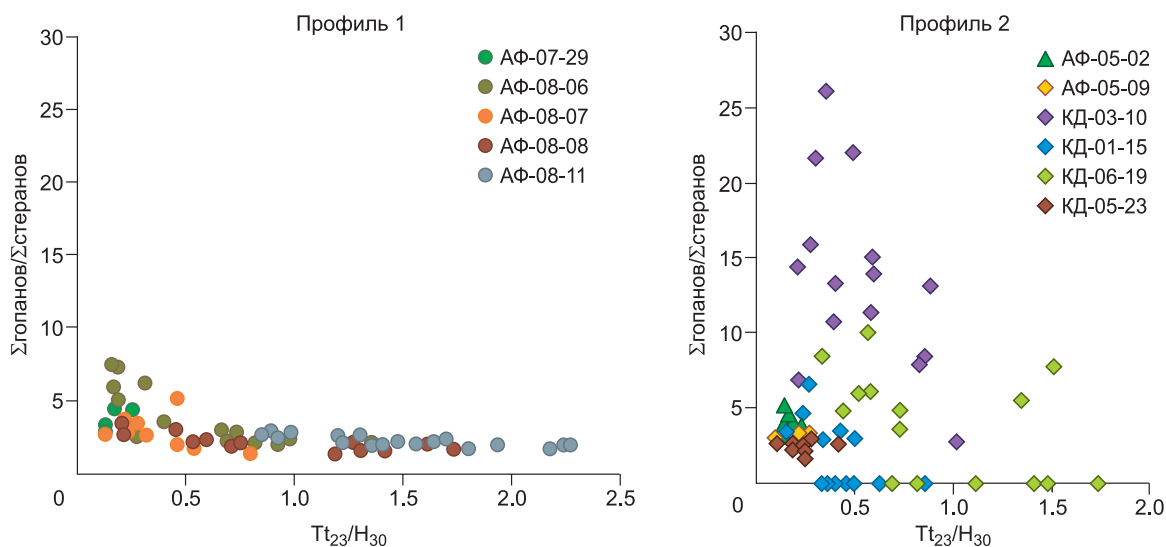


Рис. 9. Циклановые индексы, характеризующие генезис РОВ (T_{23} — C_{23} трициклан, H_{30} — C_{30} $\alpha\beta$ гопан).

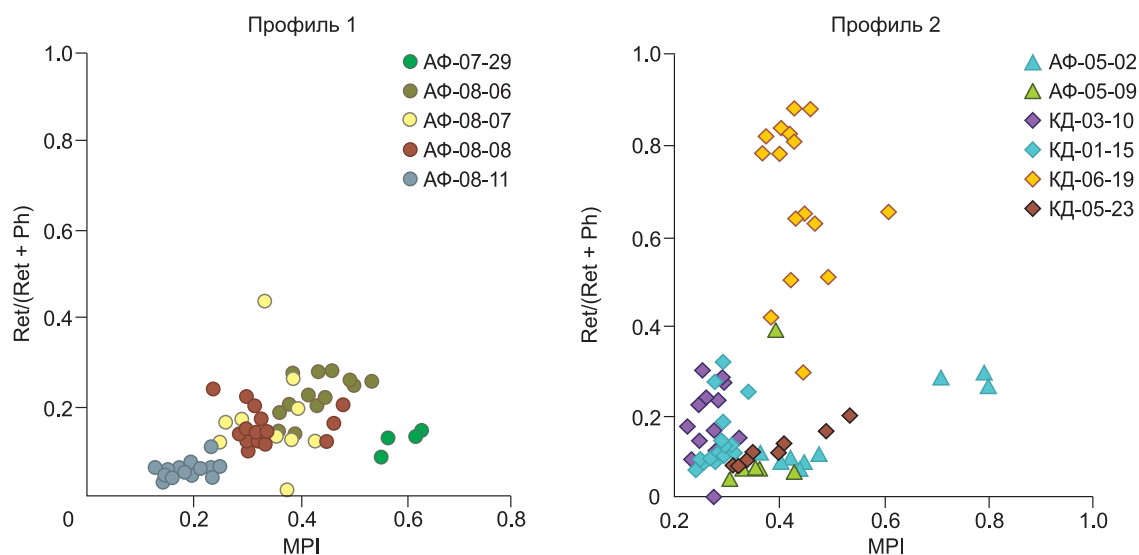


Рис. 10. Характеристика полиароматических УВ (Ret — ретен, Ph — фенантрен).

мальной зрелости обладает РОВ осадков верхней части континентального склона (ст. АФ-08-06), что согласуется с приведенными выше возрастными 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 — абиеиновой 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 (см. 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 нем РОВ. Наиболее специфичным составом полиаренов характеризуется РОВ осадков ст. КД-06-19. Наряду с повышенным содержанием продуктов трансформации эукариот (T_{23}/H_{30} до 1.7) здесь наблюдается аномальный для глубоководных осадков состав полициклических ароматических углеводородов, доминирующим компонентом которых является ретен ($Ret/\Sigma PAH$ (polycyclic aromatic hydrocarbons) >0.5 ; $Ret/(Ret + Ph)$ до 0.9). Кроме того, распределение ретена в осадочном разрезе коррелирует с содержанием

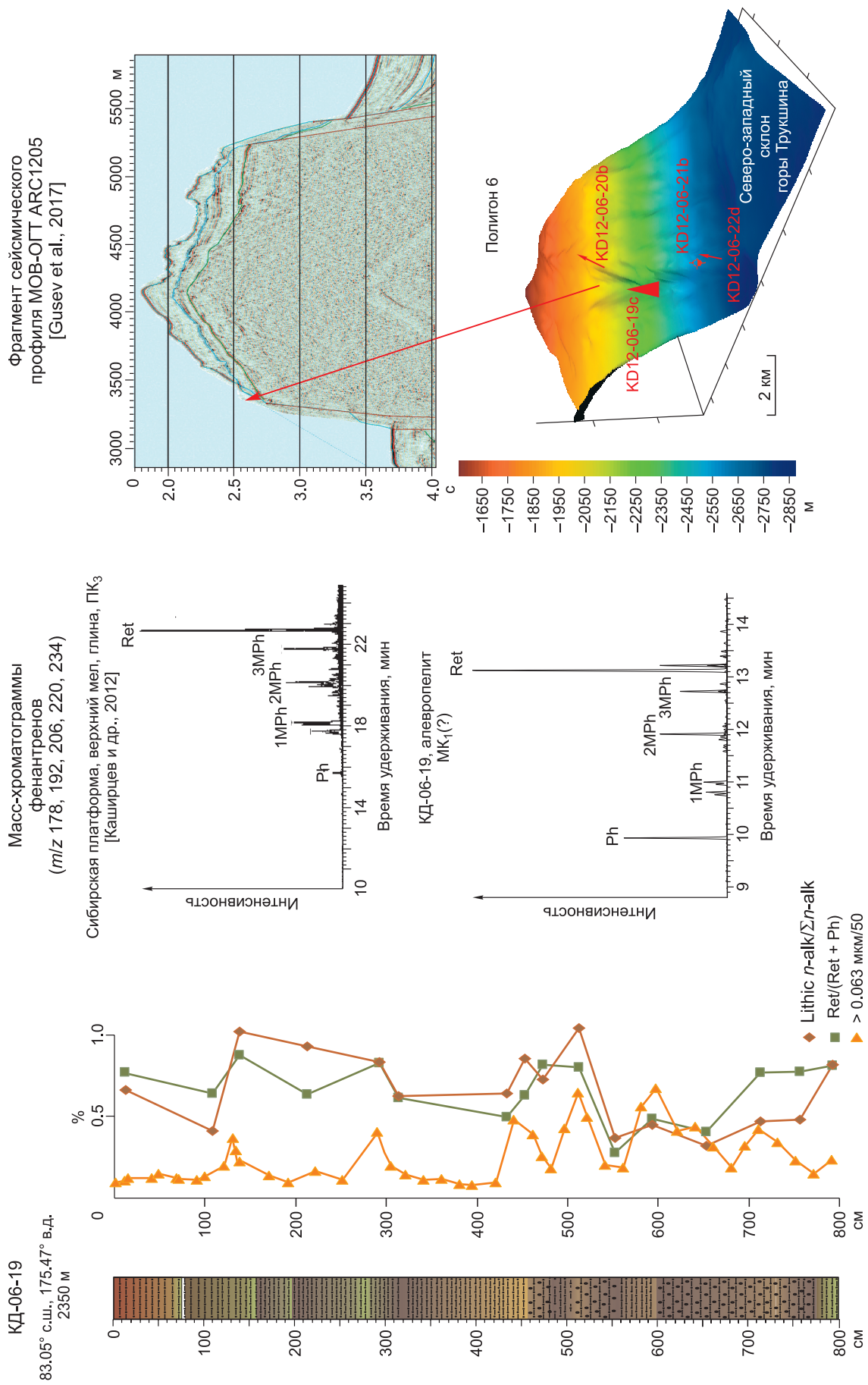


Рис. 11. Геоморфологическая и литолого-геохимическая характеристика осадочного разреза ст. КД-06-19 [Рекант и др., 2016].
МPh — метилфенантр.

литифицированных *n*-алканов C₂₅—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 слабопреобразованном РОВ сероцветных пелитов наряду с другими характерными маркерами наземной биоты (олеаненами, тетрагидрохризенами, периленом), отсутствующими в данном осадочном разрезе, что ставит под сомнение сопоставления данных объектов. Более вероятным аналогом могут быть меловые отложения Индигиро-Зырянского прогиба на северо-востоке Якутии [Каширцев и др., 2012], характеристика молекулярного состава РОВ которых весьма сходна с наблюдаемой в осадочном разрезе ст. КД-06-19 (см. 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 образца), отобранных на двух меридиональных профилях. Определены основные органогеохимические 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, обогащенного 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 определенную роль, очевидно, играют процессы субаквального размыва и переотложения продуктов денудации коренных пород и доголоценовых осадочных образований.

ЛИТЕРАТУРА

Арктический бассейн (геология и морфология) / Ред. В.Д. Каминский. СПб., ВНИИОкеангеология, 2017, 291 с.

Биогеохимия органического вещества арктических морей / Под ред. И.С. Грамберга, Е.А. Романкевича. М., Наука, 1982, 240 с.

Гусев Е.А., Рекант П.В., Большаев 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., Чалая О.Н., 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., Черкашев Г.А., Новиков Г.В., Богданова О.Ю., Кузнецов В.Ю., Рекант П.В., Мирё Дж., Диас Л., Мадурьера П. 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., Парфенова Т.М., Тимошина И.Д., Фомин А.Н., Фурсенко Е.А. Молекулы-

биомаркеры в ископаемом органическом веществе и нафтидах докембрийских и фанерозойских пород Сибири. СПб., ВНИГРИ, 2009, 108 с.

Нарышкин Г.Д. Орографическая карта Арктического бассейна (ГУНиО). СПб., 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 ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского. СПб., ВСЕГЕИ, 2017, с. 102—103.

Петрова В.И., Батова Г.И., Куршева А.В., Литвиненко И.В. Геохимия органического вещества донных отложений Центрально-Арктических поднятий Северного Ледовитого океана // 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 органического вещества 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., Миролюбова Е.С., Андреева И.А., Смирнова Л.С. Сравнительный анализ минералогических ассоциаций донных отложений прилаптевоморского сегмента хр. Ломоносова и поднятия Менделеева как один из критериев оценки источников обломочного материала // Проблемы Арктики и Антарктики, 2013, № 4 (98), с. 79—95.

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.

Рекант П.В., Гусев Е.А., Черных А.А., Супруненко О.И. Геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Океанская. Лист И-57, 58, 59, 60 — поднятие Менделеева. Объяснительная записка. СПб., ВСЕГЕИ, 2016, 100 с. + 8 вкл.

Романкевич Е.А. Геохимия органического вещества в океане. М., 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 Амеразийского бассейна Арктики в неоплейстоцене по литологическим и палеонтологическим данным // Вест. МГУ, Сер. 5. География, 2016, № 6, с. 3—17.

Фомин А.Н. Катагенез органического вещества и нефтегазоносности мезозойских (юра, триас) 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 // Org. Geochem., 2001, v. 32, № I. 10, p. 1211—1217.

Bruvold 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.

Connors J., Cassou A.M. Properties of gases and petroleum lipids derived from terrestrial kerogen at various maturation levels // Geochim. Cosmochim. Acta, 1980, № 44, p. 1—23.

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

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

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 // Mar. Petrol. Geol., 1988, v. 5, p. 224—236.

Stein R., Matthiessen J., Niessen F., Krylov A., Nam S.-I., 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., Polyak L. Changes in terrestrial organic matter input to the Mendeleev Ridge, Arctic Ocean during the Late Quaternary // Global Planet. Change, 2009, v. 68, p. 30—37.

Yamamoto M., Okino T., Sugisaki S., Sakamoto T. Late Pleistocene changes in terrestrial biomarkers in sediments from the central Arctic Ocean // Org. Geochem., 2008, v. 39, I. 6, p. 754—763.