

## МОЛЕКУЛЯРНАЯ ГЕОХИМИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ТРИАСОВЫХ ПОРОД СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ — ВЛИЯНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ И МАГМАТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

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

*Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов мирового океана им. И.С. Грамберга,  
190121, Санкт-Петербург, Английский просп., 1, Россия*

По результатам хромато-масс-спектрометрического изучения состава и распределения углеводородных молекулярных маркеров (алканов, изопреноидов, цикланов, аренов) охарактеризованы генезис, фациальные условия осадконакопления и уровень катагенеза рассеянного органического вещества триасовых отложений северо-восточной части Баренцевоморского осадочного бассейна, вскрытых опорно-параметрическим бурением на Адмиралтейском поднятии, архипелаге Земля Франца-Иосифа и Ферсмановской структуре. Показано, что позднемезозойско-кайнозойский апифт региона и последующая интенсивная магматическая деятельность оказали существенное влияние на историю их термального развития. Наиболее ярко данная тенденция проявлена в осадочном разрезе архипелага Земля Франца-Иосифа, где аддитивное воздействие указанных факторов привело к радикальному увеличению трансформации рассеянного органического вещества вплоть до градации АК<sub>1</sub>.

*Углеводородные молекулярные маркеры, рассеянное органическое вещество, катагенез, триасовые отложения, Баренцево море, Арктика.*

## MOLECULAR GEOCHEMISTRY OF ORGANIC MATTER OF TRIASSIC ROCKS IN THE NORTHEASTERN PART OF THE BARENTS SEA: THE INFLUENCE OF TECTONIC AND MAGMATIC PROCESSES

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

Samples of Triassic sediments were collected from cores of parametric boreholes drilled on the Admiralteiskii Rise, Franz Josef Land Archipelago, and Fersman structure in the northeastern part of the Barents Sea sedimentary basin. The composition and distribution of hydrocarbon biomarkers (*n*-alkanes, isoprenoids, cyclic alkanes, and polyaromatic hydrocarbons) were studied using the GC-MS method and provided information about the genesis, facies conditions of sedimentation, and catagenetic maturity stage of dispersed organic matter (DOM). The Late Mesozoic–Cenozoic uplifting of the region and active magmatic processes significantly influenced the thermal transformation of sediments. The revealed trend is best observed in the sediment section of the Franz Josef Land archipelago, where the thermal effects led to a radical increase in DOM transformation, up to the AC<sub>1</sub> stage.

*Hydrocarbon biomarkers, dispersed organic matter, catagenesis, Triassic deposits, Barents Sea, Arctic*

### ВВЕДЕНИЕ

Триасовые отложения являются наиболее мощной составляющей осадочного чехла Баренцево-морского региона. Параметрическими и поисковыми скважинами триасовые отложения вскрыты как на островах Земли Франца-Иосифа (ЗФИ), так и на акватории — в Южно-Баренцевской впадине, на валу Адмиралтейства [Геология..., 2004]. Разрез триасовых отложений представлен терригенной толщей, в низах которой локально присутствуют туфогенные породы, а в Баренцевоморском прогибе — тела базальтов. По условиям осадконакопления различаются отложения северной части шельфа, представленные в основном морскими фациями, и южной, где распространены лагунные и континентальные осадки. Соответственно, распределение генотипов рассеянного органического вещества (РОВ) носит зональный характер с накоплением гумусово-сапропелевого типа в северной части региона и сапропелево-гумусового в южной. При этом катагенетическая зрелость РОВ синхронных толщ варьирует по площади, и в ряде разрезов наблюдается ее аномально высокий уровень [Грамберг и др., 2001].

Известно, что региональный катагенез определяется целым рядом факторов: интенсивность теплового потока, давление, геологическое время, литологический состав вмещающих пород, обстановки

осадконакопления и т. д. [Фомин, 2011]. Однако большинство исследователей полагает, что главенствующую роль в этом процессе играет температура, на что указывает резкое повышение уровня катагенеза РОВ в зонах контакта осадочных пород с магматическими телами [Конторович и др., 1987; Bishop, Abbott, 1995; Jones et al., 2007; Меленевский и др., 2008].

Вместе с тем для баренцевоморского триасового комплекса пород катагенетические аномалии отмечаются не только в разрезах опорно-параметрических скважин ЗФИ, характеризующихся многочисленными внедрениями интрузивных тел, но и в районе Адмиралтейского мегавала, где повышенный уровень катагенеза связывают с влиянием мезозойско-кайнозойского аплифта [Грамберг и др., 2001]. Согласно существующим представлениям [Астафьев, 1993], верхнепермско-триасовые отложения приноземельского шельфа испытали в процессе развития региона погружение на глубины около 5 км. Соответственно, катагенетическая преобразованность РОВ в отложениях триаса варьирует от  $МК_1$  до  $МК_4$ , при этом отложения нижнего триаса ( $T_1$ ) характеризуются максимальными значениями  $R_{Vt}^0$  ( $> 0.6$ ).

В ходе проведенной ранее [Бро и др., 1989] обработки материалов параметрического бурения был детально изучен и описан керновый материал, включая характеристику вещественного состава пород, РОВ и его битуминозных компонентов. Часть этих материалов вошла в коллективную монографию российских и норвежских исследователей, посвященную геологической эволюции северной части Баренцевоморского региона [Geological aspects..., 1998]. В целом ряде публикаций [Данюшевская, 1995; Супруненко и др., 1998; Грамберг и др., 2001] приводятся данные, характеризующие литолого-фациальные условия накопления РОВ, его генезис и уровень зрелости, рассматриваются некоторые аспекты влияния интрузивных процессов на нефтематеринские свойства триасовых пород арктических островов.

Действительно, изменение РОВ пород при внедрении в осадочную толщу магматических тел, сопровождающемся тепловым, эманационным и динамическим воздействием, так называемый «контактовый метаморфизм», приводит к значительной трансформации структуры керогена [Ревердатто, Меленевский, 1986; Меленевский и др., 2006, 2008]. Наиболее сильное влияние на органическое вещество (ОВ) оказывают пластовые интрузии (силлы) основных пород, а также крупные дайки. При этом суммирование контактового и регионального катагенеза может сместить зоны нефте- и газообразования, изменить фазовый состав и условия сохранности залежей углеводородов [Конторович и др., 1987, 1996; Конторович, Хоменко, 2001; Othman et al., 2001].

Современные методы исследования, базирующиеся на анализе молекулярного состава РОВ, позволяют рассмотреть данные вопросы на новом информационном уровне. Исследования влияния текущих даек на распределение углеводородных маркеров в осадочных породах приконтактных зон показали, что воздействие носит локальный характер, не превышая 15 % мощности интрузии [Bishop, Abbott, 1995; Farrimond et al., 1999]. При этом латеральный градиент трансформации алифатических, циклических и ароматических хемофоссилий соответствует общей тенденции увеличения степени катагенетической зрелости в направлении зоны контакта.

Не вызывает сомнения, что воздействие силлов на триасовые породы ЗФИ должно сопровождаться аналогичными процессами, о чем косвенно свидетельствует петрографическое изучение катагенетической зрелости РОВ кернового материала параметрических скважин [Грамберг и др., 2001]. Было показано, что наряду с закономерным увеличением  $R_{Vt}^0$  с глубиной наблюдается аномальный рост его значений вблизи магматических тел (до стадии  $МК_5$ ). Наряду с этим отмечается, что граница стадий  $МК_2$  и  $МК_3$  в разрезе триаса Адмиралтейского мегавала также существенно превышает таковую в пределах Баренцевоморского мегапрогиба. Сочетание контактового метаморфизма и тектонических процессов неизбежно должно найти отражение в специфике молекулярного состава РОВ триасовых пород данного региона. При этом наиболее интересной представляется попытка оценить влияние каждого из этих факторов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалом исследования триасовых пород ЗФИ послужили образцы, отобранные по разрезу скважин Северная (о. Грэм-Белл) и Нагурская (о. Земля Александры). Керновый материал скв. Северная представлен средневерхнетриасовыми алевроитовыми аргиллитами анизийского, ладинского, карнийского и норийского ярусов. Алевроитовые аргиллиты нижнего—среднего триаса скв. Нагурская соответствуют индскому, оленекскому, анизийскому и ладинскому ярусам. Керновый материал, характеризующий триасовый разрез Адмиралтейского поднятия, отобран в скважинах Адмиралтейская-1 и Крестовая-1 и представлен нижнетриасовыми осадочными породами оленекского и индского ярусов. Объектом сопоставления послужил керновый материал скв. Ферсмановская-1, приуроченной к области Центрально-Баренцевских поднятий и представляющей типичный региональный разрез триаса ( $T_1$ – $T_3$ ), включая образцы пород оленекского, анизийского, ладинского и карнийского ярусов. Сходство литологического состава изученных образцов (аргиллиты, алевроаргиллиты) позволяет считать их сравнительное изучение вполне корректным.

Аналитическая процедура исследования РОВ включала: определение в породе нерастворимого остатка, содержания  $C_{\text{орг}}$ ,  $C_{\text{карб}}$ , извлечение хлороформного ( $A_{\text{хл}}$ ) и спиртобензольного ( $A_{\text{сп-б}}$ ) битумоидов, гуминовых кислот (ГК), определение группового и углеводородного состава  $A_{\text{хл}}$ .

Фракции насыщенных и ароматических углеводородов (УВ) выделялись хроматографически и исследовались методом ГХ-МС на комплексе Agilent 5973/6850 с квадрупольным масс-детектором и программным пакетом обработки аналитической информации.

*Анализ алифатических и циклических УВ:* капиллярная колонка HP DB 30 м × 0.25 мм, неподвижная фаза: 5%-й фенил- и 95%-й 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, затем удерживание 7 мин при 320 °С. Детектирование по полному ионному току (SCAN от 50 до 500  $m/z$ , 70 эВ). *n*-Алканы и изопреноиды анализировали по селективным ионам  $m/z$  71 и 183, тритерпаны по  $m/z$  191, 370, 398, 412, 426, 440, 454, стераны по  $m/z$  217, 218, 372, 386, 400.

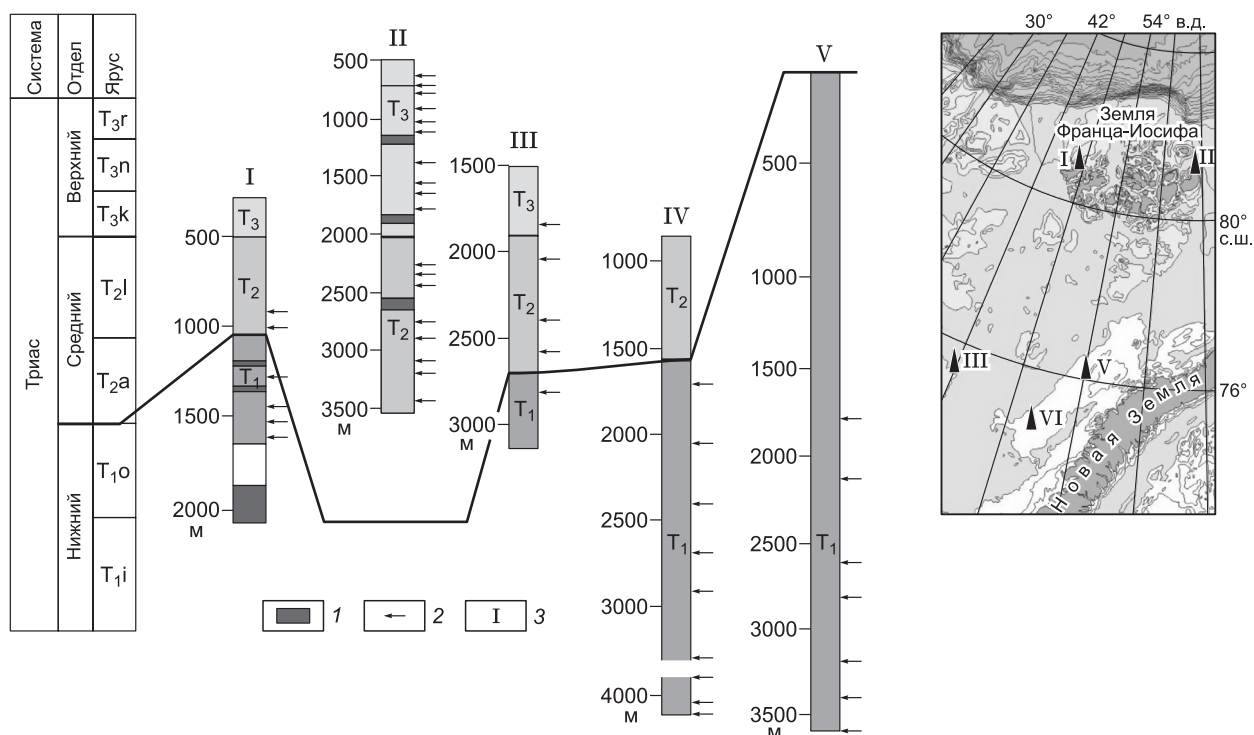
*Анализ полиароматических УВ:* капиллярная колонка HP DB 30 м × 0.25 мм, неподвижная фаза: 5%-й фенил- и 95%-й метилсиликон; газ-носитель — гелий, скорость потока 1.2 мл/мин; температура инжектора 290 °С. Температурный режим анализа: от 60 до 200 °С по 20 °С/мин, далее до 300 °С по 10 °С и удерживание 5 мин при 300 °С. Детектирование по полному ионному току (SCAN от 50 до 500  $m/z$ , 70 эВ). Голоядерные и алкилзамещенные полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) анализировали по селективным ионам  $m/z$  128, 152, 154, 178, 192, 202, 206, 228, 252, 276, 278.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### Краткая литологическая характеристика

На архипелаге ЗФИ отложения триаса, вскрытые параметрическим бурением, представлены мощной сероцветной толщей, имеющей преимущественно морской генезис и включающей магматические образования (силлы габбро-долеритового состава) раннемелового возраста [Грамберг и др., 1985].

Отложения нижнего триаса, вскрытые на ЗФИ только в скв. Нагурская, сложены в основном темно-серыми и черными аргиллитами. Скважина расположена в зоне поднятия фундамента, что и определяет неглубокую нижнюю границу залегания отложений  $T_1$  — 1700 м (рис. 1). Большинство установ-



**Рис. 1. Карта района исследования и корреляция разрезов триаса северо-восточной части баренцево-воморского региона (по материалам параметрического бурения).**

1 — интрузивное тело; 2 — интервал опробования; 3 — скважины: I — Нагурская, II — Северная, III — Ферсмановская, IV — Крестовая, V — Адмиралтейская.

ленных интрузий приурочено к фундаменту, в непосредственной близости к основанию разреза. Серии мало мощных силлов зафиксированы в отложениях оленекского яруса (1230—1278 и 1342—1376 м) (см. рис. 1).

Отложения среднего триаса (скважины Нагурская и Северная) сложены чередованием аргиллитов, алевролитов и песчаников. Наиболее полно разрез  $T_2$  вскрыт в скв. Северная в интервале 1935—3520 м и представлен ладинским и анизийским ярусами, отложения последнего осложнены мощным силлом (2551—2657 м). В среднетриасовых отложениях скв. Нагурская интрузивные породы не зафиксированы.

Верхнетриасовая часть разреза (скв. Северная) представлена отложениями карнийского и норийского ярусов, интродуцированных силами различной мощности на глубинах 1821—1908, 1174—1221 и 755—760 м (см. рис. 1).

Триасовый разрез Адмиралтейского поднятия (скв. Адмиралтейская) представлен мощной нижнетриасовой, в основном индской толщей (до 2000 м). В нижней части разреза доминируют черные кремнисто-глинистые и глинисто-кремнистые бескарбонатные породы. В верхней части триасовой толщи появляются прослои алевролитов, а затем и песчаников. В скв. Крестовая разрез представлен неравномерным чередованием аргиллитов, алевролитов и песчаников. В нем присутствуют обычные для триаса в этом регионе пестроцветные прослои, что связано, очевидно, с постепенным обмелением моря [Устрицкий и др., 2010].

В скв. Ферсмановская оленекский ярус (2718—3123 м) включает аргиллиты буровато-коричневые, темно-серые с зеленоватым оттенком, алевролиты глинистые зеленовато-серые. Средний отдел триаса (анизийский и ладинский ярусы), выделяемый в интервале глубин 2718—1894 м, сложен в основном глинистыми и глинисто-алевролитовыми литотипами с редкими прослоями песчаников. В нерасчлененной толще предположительно  $T_3$ - $J_1$  встречены темно-серые аргиллиты, нередко содержащие углефицированные древесные остатки.

### Геохимическая характеристика РОВ

Слабокарбонатные ( $C_{\text{карб}} < 3\%$ ) аргиллиты сопоставляемых отложений характеризуются невысоким содержанием органического углерода ( $C_{\text{орг}} < 2\%$ ) с преобладанием в составе растворимых компонентов РОВ нейтральных соединений ( $A_{\text{хл}}/A_{\text{сп-б}} > 1$ ) и незначительной битуминозностью ( $\beta = 0.9—5.7\%$ ). Содержание углеводов (УВ) низкое в породах нижнего триаса, несколько возрастает в отложениях среднего и верхнего отделов, состав углеводов преимущественно метаново-нафтеновый (табл. 1).

Таблица 1. Геохимическая характеристика РОВ триасовых отложений параметрических скважин (осредненные значения)

Возраст отложений	Содержание в породе, %		$A_{\text{хл}}/A_{\text{сп-б}}$	$\beta_{\text{хл}}$ , %	% УВ в породе	Состав УВ, %	
	$C_{\text{карб}}$	$C_{\text{орг}}$				Me-Nf	Ar
<b>Скв. Нагурская (6 образцов)</b>							
$T_2$	1.9	1.3	1.4	2.6	0.016	70.4	29.6
$T_1$	2.1	1.6	1.2	0.7	0.006	77.6	22.4
<b>Скв. Северная (27 образцов)</b>							
$T_3$	1.7	1.5	1.4	2.8	0.022	68.3	31.7
Аргиллит в зоне контакта, $T_3$	5.8	0.2	1.3	17.5	0.038	91.0	9.0
$T_2$	2.1	1.1	2.5	1.7	0.006	73.6	26.4
<b>Скв. Ферсмановская (5 образцов)</b>							
$T_3$	2.4	1.3	0.9	3.4	0.017	89.4	10.6
$T_2$	1.2	1.2	0.7	3.2	0.012	82.4	17.6
$T_1$	2.2	0.6	1.6	2.5	0.007	88.9	11.1
<b>Скв. Крестовая (20 образцов)</b>							
$T_1$	2.3	0.2	1.2	5.7	0.005	79.4	20.6
<b>Скв. Адмиралтейская (15 образцов)</b>							
$T_1$	2.3	1.0	2.3	0.9	0.005	80.6	19.4

Таблица 2. Характеристика *n*-алканов и изопrenoидов в составе РОВ триасовых отложений параметрических скважин (осредненные значения)

Скважина, возраст отложений	$C_{14-19}/C_{20-35}$	$C_{17}/C_{27}$	$CPI_{23-30}$	Pr/Ph	Pr/ $C_{17}$	Ph/ $C_{18}$	$K_i$
Ферсмановская, $T_3$	0.47	0.88	1.52	1.26	0.92	0.99	0.95
Северная, $T_3$	3.33	3.19	1.13	1.68	0.96	1.00	0.95
Аргиллит в зоне контакта, $T_3$	0.10	0.06	1.25	1.65	0.57	0.27	0.40
Ферсмановская, $T_2$	0.54	1.28	1.21	1.70	1.25	1.02	1.15
Нагурская, $T_2$	0.56	1.55	1.05	2.38	0.79	0.40	0.61
Северная, $T_2$	7.58	7.95	0.99	1.41	0.52	0.53	0.52
Ферсмановская, $T_1$	0.65	2.02	1.05	0.83	1.06	2.15	1.47
Нагурская, $T_1$	0.76	3.52	1.01	1.20	0.64	0.75	0.68
Крестовая, $T_1$	0.37	1.50	1.00	0.86	0.79	1.17	0.89
Адмиралтейская, $T_1$	0.73	2.82	1.11	0.82	0.71	1.06	0.87

Примечание.  $CPI = 2 \cdot (C_{23} + C_{25} + C_{27} + C_{29}) / [C_{22} + 2 \cdot (C_{24} + C_{26} + C_{28}) + C_{30}]$ . Pr — пристан, Ph — фитан.  $K_i = (Pr + Ph) / (C_{17} + C_{18})$ .

Вместе с тем на фоне подобия геохимических характеристик РОВ следует отметить ряд специфических особенностей изученных разрезов. Так, закономерное изменение геохимических параметров с глубиной, обусловленное ростом термальной зрелости РОВ, наблюдается только в скв. Ферсмановская: вниз по разрезу снижается содержание  $C_{орг}$ , растворимые компоненты РОВ приобретают восстановленный характер ( $A_{хл}/A_{сп-б} = 1.6$ ) и снижается содержание УВ, ароматичность которых минимальна (< 20 %).

В остальных разрезах изменение геохимических характеристик триасовых пород нельзя объяснить только постседиментационным преобразованием РОВ, обусловленным региональным катагенезом. Наиболее контрастно особенности РОВ триасовых пород проявляются при рассмотрении молекулярного состава УВ.

***n*-Алканы и изопrenoиды.** Геохимические характеристики алифатических УВ позволяют оценить как черты сходства, так и специфические особенности состава и уровня трансформации РОВ изученных толщ. Так, отложения нижнего триаса ( $T_1$ , табл. 2, рис. 2) большинства изученных разрезов характеризуются полимодальным молекулярно-массовым распределением *n*-алканов, что в сочетании с низкими значениями индекса нечетности ( $CPI$  около 1) и относительно невысоким содержанием изопrenoидов ( $K_i < 1$ ) указывает на значительный уровень трансформации РОВ.

Наиболее ярко эта особенность проявляется при сопоставлении геохимических показателей отложений Адмиралтейского поднятия (скважины Адмиралтейская и Крестовая) и ЗФИ (скв. Нагурская) с синхронными отложениями Ферсмановской структуры (см. табл. 2, рис. 2). Для последних, несмотря на близкое значение  $CPI$ ,  $K_i$  выше почти в 2 раза, что характерно для термально менее зрелого РОВ.

Состав и распределение алифатических УВ в отложениях среднего триаса свидетельствуют о существенных различиях как в генезисе РОВ, так и в уровне его катагенетической зрелости ( $T_2$ , см. табл. 2, рис. 2). Так, в отложениях скв. Северная (о. Грэм-Белл, ЗФИ) преобладает РОВ преимущественно аквагенного генезиса ( $C_{17}/C_{27} = 7.95$ ), сформированного в мелководно-морских условиях осадконакопления (Pr/Ph = 1.4) [Peters et al., 2004]. Это согласуется с результатами микроскопических исследований, согласно которым в данном интервале разреза РОВ представлено преимущественно сапропелевым материалом (коллоальгинитом до 70—80 %) [Преображенская и др., 1985]. Среднетриасовые породы скв. Нагурская (о. Александры, ЗФИ) содержат, очевидно, РОВ смешанного сапропелево-гумусового генезиса, однако значительный уровень трансформации не позволяет утверждать это определенно. Бимодальное распределение *n*-алканов синхронных отложений скв. Ферсмановская свидетельствует о смешанном сапропелево-гумусовом генезисе РОВ и, по-видимому, меньшей термальной зрелости.

Сопоставление состава алифатических углеводородов отложений верхнего триаса ( $T_3$ , см. табл. 2, рис. 2) скважин Ферсмановская и Северная свидетельствует о значительном преобладании гумусовой составляющей в породах первой ( $C_{17}/C_{27} = 0.88$  и 3.19 соответственно). Данное наблюдение соответствует существующим представлениям о морских фациальных условиях осадконакопления для северной части Баренцевоморского региона и лагунно-континентальных для южных и центральных частей в поздне триасовую эпоху [Бро и др., 1989; Басов и др., 2009]. Следует отметить также большую термальную зрелость РОВ пород ЗФИ, что вызвано, очевидно, контактовым метаморфизмом. Влияние магматизма на геохимические параметры РОВ может быть проиллюстрировано на примере верхнетриасового аргиллита, отобранного в зоне контакта с интрузивным телом (см. рис. 2, табл. 2). В составе *n*-алканов

**Рис. 2. Молекулярно-массовое распределение *n*-алканов в триасовых отложениях параметрических скважин.**

наблюдается утрата низкомолекулярных соединений ( $C_{14-19}/C_{20-35} = 0.10$ ), что может быть обусловлено локальной миграцией *in situ* [Othman et al., 2001]. Это коррелирует с результатами Rock-Eval пиролиза, согласно которым в ряде образцов вышележащих отложений отмечается относительное повышение значений  $S_1$  (до 0.7), свидетельствующее о возможном присутствии несвязанных УВ.

Генетический тип исходного ОВ, особенно условия осадконакопления и уровень термальной зрелости РОВ изученных разрезов наглядно иллюстрирует диаграмма Кеннона-Кассоу (рис. 3).

Так, согласно соотношениям изопреноидных коэффициентов (*изо*- $C_{19}/n$ - $C_{17}$ ; *изо*- $C_{20}/n$ - $C_{18}$ ; см. рис. 3), РОВ пород скв. Ферсмановская характеризуется невысоким уровнем термальной зрелости ( $T_{max} = 430-440$  °С), а условия его формирования изменялись вверх по разрезу от мелководно-морских до лагунно-континентальных.

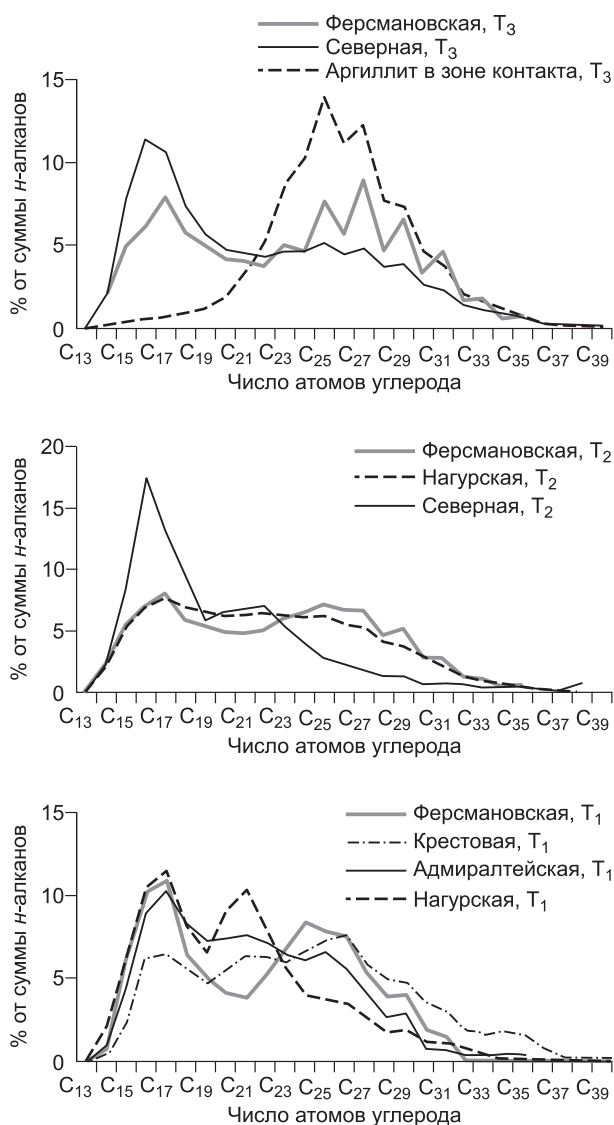
Нижнетриасовые породы Адмиралтейского поднятия (скважины Адмиралтейская и Крестовая) содержат термально зрелое РОВ ( $T_{max} = 450$  °С), сформированное в мелководно-морских условиях. Как было сказано выше, верхнепермско-триасовые отложения приновоземельского шельфа испытали в процессе развития региона значительное погружение [Астафьев, 1993]. Повышенный относительно регионального уровня катагенеза вызван влиянием последующего мезозойско-кайнозойского апфлита, определившим более высокое гипсометрическое положение зон катагенеза [Граumberг и др., 2001].

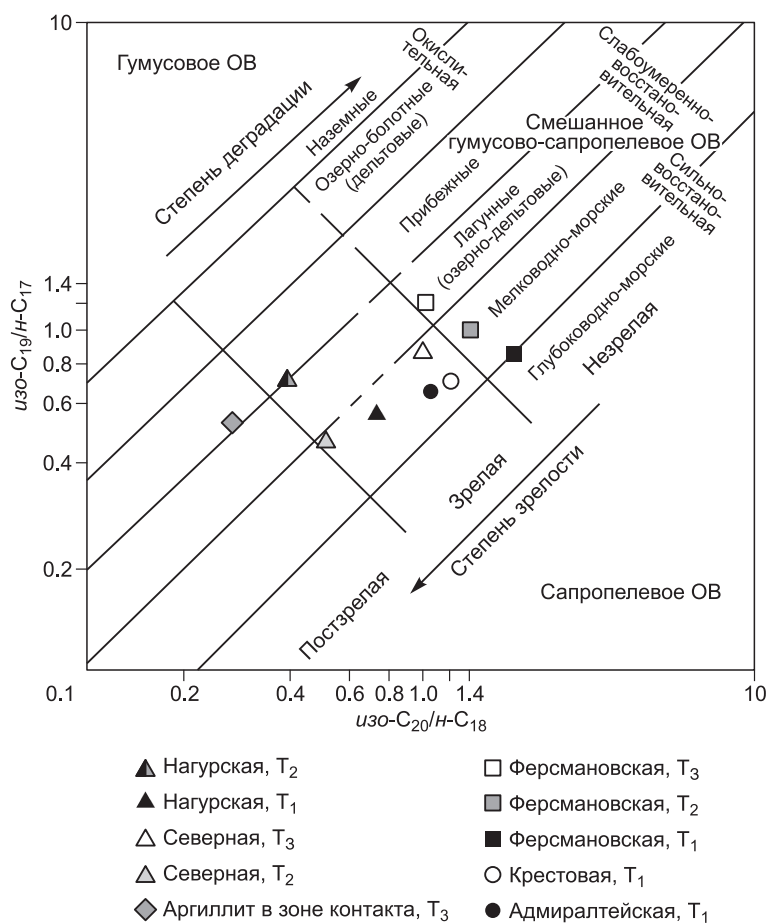
РОВ триасовых пород ЗФИ (скважины Северная и Нагурская) характеризуется значительным уровнем термальной зрелости ( $T_{max} = 440-500$  °С), что соответствует стадии катагенеза до МК<sub>4</sub> и выше и обусловлено, очевидно, влиянием контактового метаморфизма. Это подтверждает постзрелый уровень термального преобразования РОВ верхнетриасового аргиллита, отобранного в зоне контакта с магматическими породами.

Вместе с тем нельзя не учитывать вовлеченность ЗФИ в процесс регионального раннемелового апфлита (К<sub>1</sub>g), наиболее ярко проявленного в западной части архипелага [Арктические моря..., 2004], на что указывает значительное (около 2500 м) различие гипсометрического положения триасовых отложений скважин Нагурская и Северная (см. рис. 1). Воздействие тектонических факторов может также приводить к смещению регионального стратотипического уровня катагенеза [Граumberг и др., 2001].

**Терпаны.** Терпановые показатели условий формирования РОВ большинства изученных пород свидетельствуют о мелководно-морских и/или лагунных фациальных обстановках осадконакопления ( $H_{29}/H_{30} < 1$ ;  $H_{35}/H_{34} < 1$ ; табл. 3) [Каширцев, 2003; Peters et al., 2004]. Последовательное снижение значений данных параметров от нижнего триаса к верхнему наиболее отчетливо прослеживается для разреза скв. Ферсмановская и отражает региональный тренд триасовой регрессии [Басов и др., 2009]. Исключение составляют среднетриасовые породы скв. Северная, для которых соотношение  $H_{35}/H_{34} > 1$  указывает на морские условия формирования.

Следует отметить значительные вариации трицикланового индекса ( $T_{23}/H_{30} = 0.04-0.54$ ) (см. табл. 3). С одной стороны, это может быть признаком соотношения в составе исходного ОВ про- и эукариот [Конторович и др., 2009], в то же время известно, что трицикланы обладают большей термодинамической стабильностью, чем гопаны [Peters et al., 2004]. Учитывая, что повышенное содержание





**Рис. 3.** Характеристика генетического типа и фациальных условий осадконакопления РОВ триасовых отложений параметрических скважин (диаграмма Кеннона-Кассоу) [Connan, Cassou, 1980].

трициклов наблюдается в толщах, приуроченных к зонам влияния интрузий, последний фактор представляется более значимым.

Гопановые коэффициенты зрелости для нижнетриасовых пород Адмиралтейского поднятия и ЗФИ соответствуют значениям, характерным для катагенетически зрелого РОВ ( $H_{31} 22S/(22S + 22R) = 0.58—0.59$ ;  $H_{31} \beta\alpha/(\alpha\beta + \beta\alpha) = 0.08—0.11$ ;  $Ts/(Ts + Tm) = 0.36—0.46$ ). Известно, что термодинамический предел изомеризации гопановых эпимеров для первого показателя достигается при  $MK_1$  ( $R_{vt}^o = 0.6\%$ ), для второго — на границе  $MK_1$ - $MK_2$  ( $R_{vt}^o = 0.7\%$ ). Третий показатель имеет значительно больший диапазон информативности и достигает термодинамического равновесия ( $Ts/(Ts + Tm) = 1$ ) на стадии  $MK_4$ - $MK_5$  [Peters et al., 2004]. Следовательно, можно

полагать, что уровень термальной зрелости данных пород варьирует в диапазоне  $MK_1$ - $MK_3$ . Уровень катагенеза РОВ нижнетриасовых пород Ферсмановской структуры заметно ниже — не более  $MK_1$  ( $H_{31} \beta\alpha/(\alpha\beta + \beta\alpha) = 0.13$ ;  $Ts/(Ts + Tm) = 0.29$ ) — и соответствует, очевидно, региональному.

Для пород среднетриасового возраста отмеченная тенденция сохраняется. Так, термальная зрелость РОВ отложений ЗФИ (скважины Нагурская и Северная) достигает уровня  $MK_2$  (см. табл. 3), в то время как в синхронных породах скв. Ферсмановская не превышает  $MK_1$ .

Значения показателей термальной зрелости РОВ верхнетриасовых пород скважин Северная и Ферсмановская не столь контрастны, однако соотношение трисноргопанов  $Ts/(Ts + Tm)$  для последних

**Таблица 3.** Характеристика терпанов в составе РОВ триасовых отложений параметрических скважин (осредненные значения)

Скважина, возраст отложений	$H_{29}/H_{30}$	$H_{35}/H_{34}$	$Ts/(Ts + Tm)$	$C_{31}S/(S + R)$	$H_{30} \beta\alpha/(\alpha\beta + \beta\alpha)$	$T_{23} H_{30}$
Ферсмановская, $T_3$	0.55	0.42	0.14	0.57	0.23	0.04
Северная, $T_3$	0.68	0.55	0.24	0.56	0.20	0.28
Ферсмановская, $T_2$	0.83	0.51	0.10	0.58	0.23	0.09
Нагурская, $T_2$	0.52	0.36	0.41	0.59	0.13	0.16
Северная, $T_2$	0.73	1.25	0.45	0.58	0.03	0.50
Ферсмановская, $T_1$	0.81	0.66	0.29	0.58	0.13	0.29
Нагурская, $T_1$	0.77	0.69	0.36	0.59	0.11	0.54
Крестовая, $T_1$	0.80	0.72	0.46	0.58	0.10	0.29
Адмиралтейская, $T_1$	0.72	0.88	0.40	0.58	0.08	0.21

Примечание.  $H_{29}$  —  $C_{29}$  гопан,  $H_{30}$  —  $17\alpha$ ,  $21\beta$ -гопан;  $H_{35}$  —  $C_{35}$  гомогопан,  $H_{34}$  —  $C_{34}$  гомогопан;  $Ts$  —  $18\alpha(H)$ -22, 29, 30-триснорнегопан;  $Tm$  —  $17\alpha$ -22, 29, 30-трисноргопан;  $T_{23}$  —  $C_{23}$  трициклический терпан.

Таблица 4.

Характеристика стеранов в составе РОВ триасовых отложений параметрических скважин (осредненные значения)

Скважина, возраст отложений	$C_{27}(\alpha\beta\beta + \alpha\alpha\alpha)/C_{29}(\alpha\beta\beta + \alpha\alpha\alpha)$	$C_{28}(\alpha\beta\beta + \alpha\alpha\alpha)/C_{29}(\alpha\beta\beta + \alpha\alpha\alpha)$	$C_{29} \alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta + \alpha\alpha\alpha)$	$C_{29} 20S/(20S + 20R)$	$(\alpha\beta\beta S + \alpha\beta\beta R)/\alpha\alpha\alpha R (K_2)$
Ферсмановская, T <sub>3</sub>	0.39	0.33	0.35	0.27	0.69
Северная, T <sub>3</sub>	0.64	0.53	0.42	0.44	1.57
Ферсмановская, T <sub>2</sub>	0.43	0.42	0.38	0.40	1.03
Нагурская, T <sub>2</sub>	0.51	0.44	0.34	0.48	1.13
Северная, T <sub>2</sub>	1.05	0.79	0.53	0.43	2.01
Ферсмановская, T <sub>1</sub>	0.72	0.55	0.53	0.44	1.89
Нагурская, T <sub>1</sub>	0.97	0.74	0.46	0.48	1.94
Крестовая, T <sub>1</sub>	0.88	0.65	0.58	0.49	3.12
Адмиралтейская, T <sub>1</sub>	0.85	0.59	0.53	0.48	2.15

вдвое ниже и соответствует, скорее, стадии ПК<sub>3</sub>, что согласуется с результатом углепетрографических исследований ( $R_{vt}^0 = 0.43—0.50\%$ ) [Грамберг и др., 2001].

**Стераны.** В гомологическом ряду стеранов ( $C_{27}—C_{30}$ ), содержащихся в нижнетриасовых аргиллитах изученных разрезов, соотношение холестанов и этилхолестанов  $C_{27}(\alpha\beta\beta + \alpha\alpha\alpha)/C_{29}(\alpha\beta\beta + \alpha\alpha\alpha) < 1$  (табл. 4), что характерно для РОВ смешанного сапропелево-гумусового состава. При этом сапропелевая составляющая наиболее выражена в породах ЗФИ (скв. Нагурская), а гумусовая в скв. Ферсмановская.

В среднетриасовых разрезах соотношение стерановых УВ указывает на преобладание сапропелевого РОВ также в породах ЗФИ (скв. Северная) и значительно более низкое его содержание в породах Ферсмановской структуры. Данная тенденция сохраняется и в верхнетриасовом отделе изученных разрезов.

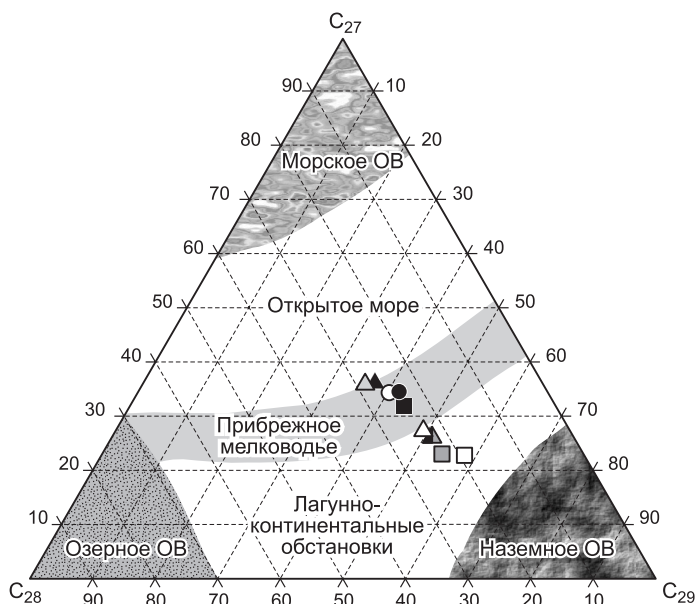
В целом фациальные обстановки осадконакопления могут быть охарактеризованы триплетом, приведенным на рис. 4. Согласно данной схеме, в мелководно-морских условиях проходило формирование РОВ нижнетриасовых пород скв. Нагурская и среднетриасовых пород скв. Северная. Прибрежно-морские фациальные обстановки характерны для РОВ нижнетриасовых пород Адмиралтейского поднятия (скважины Адмиралтейская и Крестовая) и скв. Ферсмановская, а также верхнетриасовых отложений скв. Северная. Среднетриасовые отложения скв. Нагурская, а также средне- и верхнетриасовые скв. Ферсмановская приурочены к лагунным и/или прибрежно-дельтовым фациям, что и определяет преимущественно сапропелево-гумусовый генезис содержащегося в них РОВ. Данный вывод находится в полном соответствии с характеристикой других групп углеводородных маркеров (*n*-алканов, изопреноидов, терпанов).

Таким образом, можно заключить, что в Баренцевоморском регионе смена фациальных условий осадконакопления от нижнего к верхнему триасу имела общий регрессивный тренд, наиболее ярко выраженный в западной части акватории.

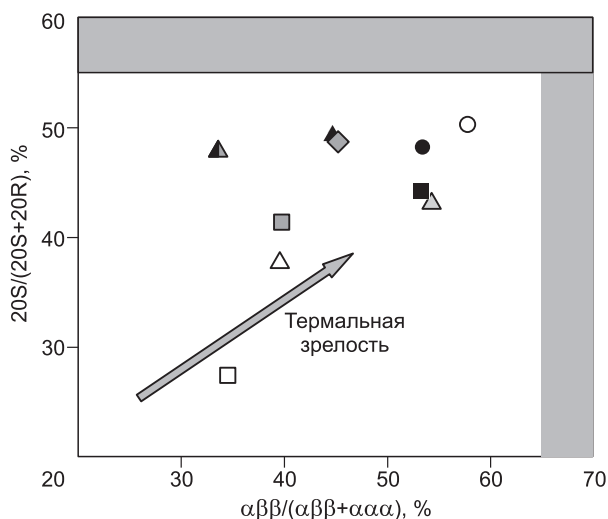
Уровень катагенной трансформации РОВ по стерановым коэффициентам зрелости наглядно иллюстрируют табл. 4 и диаграмма, приведенная на рис. 5. С ростом катагенеза в составе *aaa*-стеранов возрастает относительное содержание более термодинамически стабильных S-изомеров. При этом параметр, отражающий процесс термальной изомеризации,  $C_{29} \alpha\alpha 20S/(20S + 20R)$ , изменяется от 0 до ~0.5, что соответствует стадии > МК<sub>1</sub>. Еще одним показателем уровня термальной трансформации РОВ является

**Рис. 4. Фациально-генетическая характеристика РОВ триасовых отложений параметрических скважин (по составу стеранов, %).**

Усл. обозн. см. на рис. 3.







**Рис. 5. Корреляция стерановых коэффициентов зрелости РОВ триасовых отложений параметрических скважин.**

Усл. обозн. см. на рис. 3.

показатель изомеризации регулярных стеранов  $C_{29}$   $\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta + \alpha\alpha\alpha)S$ , достигающий термодинамического равновесия при  $MK_2$ , изменяясь от 0 до  $\sim 0.7$  [Peters et al., 2004].

В изученных разрезах оба показателя свидетельствуют о существенном уровне термальной зрелости РОВ ниже- и среднетриасовых отложений Адмиралтейского поднятия и ЗФИ. При этом стратиграфически обусловленная закономерность увеличения этих показателей вниз по разрезу четко выражена только для скв. Ферсмановская, породы которой не испытывали интенсивного тектонического и магматического воздействия.

Об этом же свидетельствуют и значения стеранового коэффициента зрелости  $K_2$  (см. табл. 4), максимальные для пород Адмиралтейского поднятия и минимальные для отложений Ферсмановской структуры.

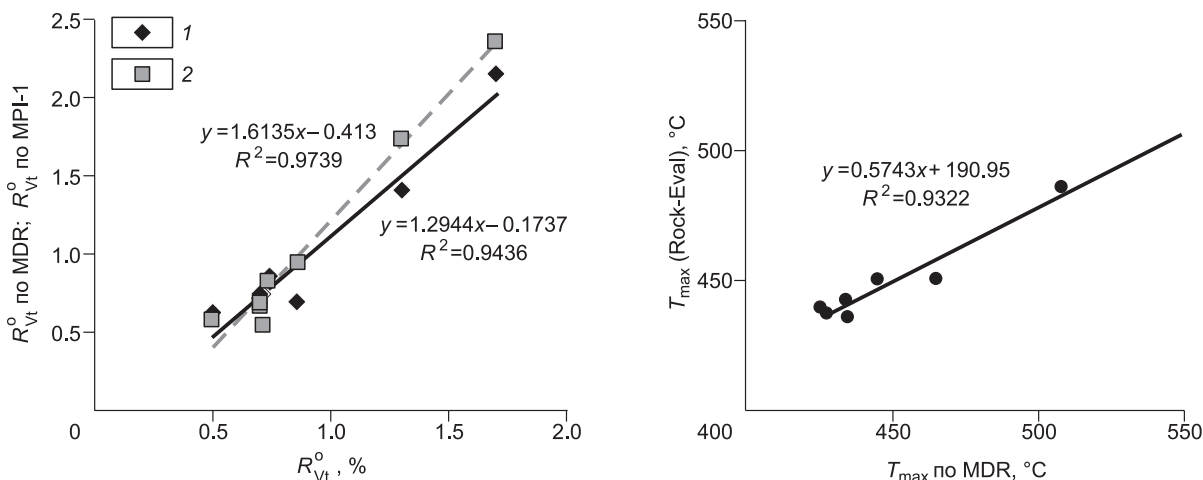
**Арены.** Оценка уровня термальной зрелости РОВ может быть выполнена на основании соотношения содержания молекул ароматического строения различной термодинамической устойчивости [Radke, 1988; Peters et al., 2004]. Одним из таких показателей является метилфенантеновый индекс (MPI), отражающий отношение 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 ( $R_{Vt}^o$ ), что позволяет провести его теоретический расчет.

Еще одним параметром, позволяющим оценить уровень термальной зрелости РОВ, является дибензотиофеновый индекс, отражающий соотношение двух изомеров монометилдибензотиофена ( $MDR = 4-MDBT/1-MDBT$ ). В работе [Radke, Willsch, 1994] предложены формулы расчета  $R_{Vt}^o$  и  $T_{max}$  по данному показателю:

$$R_{Vt}^o = 0.51 + 0.073 \times MDR,$$

$$T_{max} = 423 + 5.1 \times MDR.$$

В табл. 5 приведены аналитические ( $R_{Vt}^o$  и Rock-Eval) и рассчитанные по MPI-1 и MDR параметры термальной зрелости РОВ изученных пород. Об адекватности произведенных расчетов свидетельствуют высокие значения коэффициентов их корреляции (рис. 6). Совпадение результатов исследований,



**Рис. 6. Корреляция аналитических и расчетных показателей термальной зрелости РОВ триасовых отложений параметрических скважин.**

1, 2 — расчет  $R_{Vt}^o$ : 1 — по MPI-1, %; 2 — по MDR, %.

Таблица 5. Параметры термальной зрелости триасовых отложений параметрических скважин (осредненные значения)

Скважина, возраст отложений	$R_{Vt}^o$ , %	$R_{Vt}^o$ по MPI-1, %	$R_{Vt}^o$ по MDR, %	$T_{max}$ по MDR, °C	$T_{max}$ (Rock-Eval), °C	Стадия катагенеза	
						[Неручев и др., 1976]	[Конторович, 1976]
Ферсмановская, T <sub>3</sub>	0.50	0.62	0.58	428	437	МК <sub>1</sub>	МК <sub>1</sub>
Северная, T <sub>3</sub>	0.70	0.74	0.68	435	443	МК <sub>2</sub>	МК <sub>2</sub>
Аргиллит в зоне контакта, T <sub>3</sub>	—	0.92	—	—	—	МК <sub>3</sub>	МК <sub>2</sub>
Ферсмановская, T <sub>2</sub>	0.70	0.72	0.68	435	436	МК <sub>2</sub>	МК <sub>1</sub>
Нагурская, T <sub>2</sub>	0.71	0.75	0.55	426	439	МК <sub>2</sub>	МК <sub>1</sub>
Северная, T <sub>2</sub>	1.30	1.41	1.73	508	486	МК <sub>5</sub>	МК <sub>3</sub>
Ферсмановская, T <sub>1</sub>	0.74	0.85	0.83	445	450	МК <sub>2-3</sub>	МК <sub>1</sub> —МК <sub>2</sub>
Нагурская, T <sub>1</sub>	1.70	2.15	2.35	549	—	АК <sub>1</sub>	АК <sub>1</sub>
Крестовая, T <sub>1</sub>	0.87	0.70	0.95	453	—	МК <sub>3</sub> —МК <sub>4</sub>	МК <sub>2</sub> —МК <sub>3</sub>
Адмиралтейская, T <sub>1</sub>	—	0.89	1.12	466	451	МК <sub>3</sub> —МК <sub>4</sub>	МК <sub>2</sub>

Примечание.  $R_{Vt}^o$  — отражательная способность витринита, определенная в шлифах;  $R_{Vt}^o$  по MPI-1 — отражательная способность витринита, рассчитанная по метилфенантроновому индексу [Peters et al., 2004];  $R_{Vt}^o$  по MDR — отражательная способность витринита, рассчитанная по дибензтиофеновому индексу [Radke, Willsch, 1994];  $T_{max}$  по MDR — значения, рассчитанные по дибензтиофеновому индексу [Radke, Willsch, 1994];  $T_{max}$  (Rock-Eval) — результаты инструментального определения.

полученных несколькими независимыми методами, не только расширяет информационное поле, но и повышает его достоверность.

Согласно приведенным данным, наибольшим уровнем термальной зрелости характеризуются ниже- и среднетриасовые породы ЗФИ. Уровень катагенеза нижнетриасовых пород Адмиралтейского поднятия (скв. Крестовая) заметно ниже и не превышает МК<sub>3-4</sub> (см. табл. 5). Вертикальная катагенетическая зональность триасового разреза Ферсмановской структуры характеризуется последовательной сменой уровней термальной зрелости от МК<sub>2-3</sub> до МК<sub>1</sub>.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ особенностей молекулярного состава РОВ триасовых пород северо-восточного сектора Баренцева моря позволяет сделать вывод, что латеральные вариации уровня катагенной зрелости РОВ в значительной мере определяются вовлеченностью осадочной толщи в постседиментационные тектонические и магматические процессы. Так, вертикальная катагенная зональность триасовых отложений Ферсмановской структуры, формирование которых проходило вне воздействия данных факторов, соответствует региональному тренду. РОВ нижнетриасовых пород Адмиралтейского поднятия под воздействием значительного погружения достигло высоких градаций катагенеза (до МК<sub>3-4</sub>). Последующий апфит вывел отложения, содержащие термально-зрелое РОВ, на нехарактерный гипсометрический уровень. Аддитивное воздействие позднемезозойско-кайнозойского апфита и высокая насыщенность разреза магматическими образованиями определили аномально высокий уровень термальной зрелости РОВ триасовых отложений ЗФИ, наиболее ярко проявленный в разрезе скв. Нагурская (до АК<sub>1</sub>).

Полученные данные дополняют и актуализируют результаты предшествующих геолого-геофизических исследований осадочного чехла Баренцевоморского региона. При этом следует отметить высокую информативность исследований молекулярного состава РОВ как неотъемлемого компонента познания процессов нефтидогенеза.

Авторы выражают искреннюю благодарность коллегам О.Н. Зуйковой, М.Н. Руденко и Н.В. Устинову за консультации в процессе подготовки рукописи.

## ЛИТЕРАТУРА

Астафьев О.В. Геологические предпосылки выявления залежей углеводородов в верхнепалеозойско-мезозойских отложениях Приновоземельского шельфа // Нефтегазоносность Баренцево-Карского шельфа (по материалам бурения на море и островах). СПб., ВНИИОкеангеология, 1993, с. 37—43.

Басов В.А., Василенко Л.В., Вискунова К.Г., Кораго Е.А., Корчинская М.В., Куприянова Н.В., Повышева Л.Г., Преображенская Э.Н., Пчелина Т.М., Столбов Н.М., Суворова Е.Б., Супрунен-

**ко О.И., Сулова В.В., Устинов Н.В., Устрицкий В.И., Фефилова Л.А.** Эволюция обстановок осадко-накопления Баренцево-Северо-Карского палеобассейна в фанерозе // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2009, т. 4, № 1, [http://www.ngtr.ru/rub/2/3\\_2009.pdf](http://www.ngtr.ru/rub/2/3_2009.pdf)

**Бро Е.Г., Пчелина Т.М., Преображенская Э.Н., Ронкина З.З., Войцеховская А.Г., Краснова В.А., Можаяева О.В.** Осадочный чехол Баренцевоморского шельфа по данным параметрического бурения на островах // Проблемы нефтегазоносности Мирового океана. М., Наука, 1989, с. 191—197.

**Геология** и полезные ископаемые России. Т. 5, Кн. 1. Арктические моря / Под ред. И.С. Грамберга, В.Л. Иванова, Ю.Е. Погребницкого. СПб., Изд-во ВСЕГЕИ, 2004, 486 с.

**Грамберг И.С., Школа И.В., Бро Е.Г., Шеходанов В.А., Армишев А.М.** Параметрические скважины на островах Баренцева и Карского морей // Советская геология, 1985, № 1, с. 95—98.

**Грамберг И.С., Евдокимова Н.К., Супруненко О.И.** Катагенетическая зональность осадочного чехла Баренцевоморского шельфа в связи с нефтегазоносностью // Геология и геофизика, 2001, т. 42 (11—12), с. 1808—1820.

**Данюшевская А.И.** Нефтегазопроизводящие толщи фанерозойских отложений арктических островов // Геохимия, 1995, № 10, с. 1495—1505.

**Каширцев В.А.** Органическая геохимия нафтидов Сибирской платформы. Якутск, ЯФ Изд-ва СО РАН, 2003, 160 с.

**Конторович А.Э.** Геохимические методы количественного прогноза нефтегазоносности. М., Недра, 1976, 248 с.

**Конторович А.Э., Хоменко А.В.** Теоретические основы прогноза нефтегазоносности осадочных бассейнов с интенсивным проявлением траппового магматизма // Геология и геофизика, 2001, т. 42 (11—12), с. 1764—1773.

**Конторович А.Э., Мельников Н.В., Старосельцев В.С., Хоменко А.В.** Влияние интрузивных траппов на нефтегазоносность палеозойских отложений Сибирской платформы // Геология и геофизика, 1987, (5), с. 14—20.

**Конторович А.Э., Филипцов Ю.А., Битнер А.К., Стасова О.Ф., Хоменко А.В.** Кембрийские нефти, газы и конденсаты на Сибирской платформе в районах развития траппового магматизма // Геохимия, 1996, № 9, с. 681—692.

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

**Меленевский В.Н., Сокол Э.В., Фомин А.Н.** Преобразование угля в процессе высокотемпературного катагенеза // Геология и геофизика, 2006, т. 47 (9), с. 1005—1012.

**Меленевский В.Н., Фомин А.Н., Конышев А.С., Талибова О.Г.** Контактное преобразование угля под воздействием долеритовой дайки (Кайерканское месторождение, Норильский район) // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (9), с. 886—893.

**Неручев С.Г., Вассоевич Н.Б., Лопатин Н.В.** О шкале катагенеза в связи с нефтегазообразованием // Горючие ископаемые: проблемы геологии и геохимии нафтидов и битуминозных пород / Ред. Н.Б. Вассоевич. М., Наука, 1976, с. 47—62.

**Преображенская Э.Н., Школа И.В., Сергеев Д.В., Можаяева О.В.** Вещественный состав и условия формирования триасовых отложений архипелага Земля Франца-Иосифа (по материалам параметрического бурения) // Геологическое строение Баренцево-Карского шельфа. Л., ПГО «Севморгеология», 1985, с. 74—87.

**Ревердатто В.В., Меленевский В.Н.** Влияние магматического тепла на генерацию и дегенерацию углеводородов вблизи интрузивных тел базальтов // Докл. АН СССР, 1986, т. 286, № 3, с. 409—411.

**Супруненко О.И., Евдокимова Н.К., Школа И.В., Бро Е.Г., Дибнер В.Д., Макарьев А.А., Столбов Н.М., Устинов Н.В.** Перспективы нефтегазоносности архипелага Земля Франца-Иосифа // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. СПб., ВНИИОкеангеология, 1998, вып. 2, с. 153—168.

**Фомин А.Н.** Катагенез органического вещества и нефтегазоносность мезозойских и палеозойских отложений Западно-Сибирского мегабассейна. Новосибирск, ИНГГСО РАН, 2011, 331 с.

**Устрицкий В.И., Павлов С.П., Пovyшева Л.Г.** История формирования современной структуры Новой Земли и Адмиралтейского поднятия // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. СПб., ВНИИОкеангеология, 2010, с. 48—56. (Тр. ВНИИОкеангеология, вып. 7).

**Bishop A.N., Abbott G.D.** Vitrinite reflectance and molecular geochemistry of Jurassic sediments: the influence of heating by Tertiary dykes (northwest Scotland) // Org. Geochem., 1995, v. 22, № 1, p. 165—177.

**Connan J., Cassou A.** Properties of gases and petroleum liquids derived from terrestrial kerogen at various maturation level // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1980, v. 44, № 1, p. 10—23.

**Farrimond P., Bevan J.C., Bishop A.N.** Tricyclic terpane maturity parameters: response to heating by an igneous intrusion // *Org. Geochem.*, 1999, v. 30, № 8, p. 1011—1019.

**Geological aspects of Franz Josef Land and the northernmost Barents sea** / Eds. A. Solheim, E. Musatov, Heintz N. Oslo, Meddelelser, Norsk Polarinstitut, 1998, 120 p.

**Jones S.F., Wielens H., Williamson M.C., Zentilli M.** Impact of magmatism on petroleum systems in the Sverdrup basin, Canadian Arctic islands, Nunavut: a numerical modelling study // *J. Petrol. Geol.*, 2007, v. 30, № 3, p. 237—255.

**Othman R., Aroui K.R., McKirdy D.M.** Oil generation by igneous intrusions in the northern Gunnedah Basin, Australia // *Org. Geochem.*, 2001, v. 32, № 10, p. 1219—1232.

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

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

**Radke M., Willsch H.** Extractable alkyldibenzothiophenes in Posidonia Shale (Toarcian) source rocks: relationships of yields to petroleum formation and expulsion // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1994, v. 58, p. 5223—5244.

*Поступила в редакцию  
28 июля 2016 г.*