

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Поступила в редакцию 11.03.2024 г.

Принята к публикации 17.04.2024 г.

EDN: NOAPCK

УДК 553.983+551.762.3(571.1)

Сотнич И.С., Костырева Е.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия, SotnichIS@ipgg.sbras.ru, KostyrevaEA@ipgg.sbras.ru

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФЕНАНТРЕНОВ В АКВАГЕННОМ ОРГАНИЧЕСКОМ ВЕЩЕСТВЕ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Рассмотрены особенности распределения фенантронов в баженовской свите юго-востока Западной Сибири. Показано, что с ростом зрелости органического вещества общее содержание фенантронов в битумоидах возрастает, при этом среди них увеличиваются концентрации моно-, ди- и триметилзамещенных гомологов. Установлено, что в качестве основных показателей зрелости органического вещества можно использовать модифицированный фенантеновый параметр ($PP-I_{mod} = (1MФ + 9MФ) / (2MФ + 3MФ)$), фенантеновый индекс ($ФИ = 2MФ / Ф$), соотношения 1,1,7,8-тетраметил-1,2,3,4-тетрагидрофенантрен/1,7,8-триметилфенантрен, $9MФ / 1MФ$, $9MФ / Ф$ и $1MФ / Ф$, однако следует учитывать влияние на них первично-миграционных процессов в преобразованном органическом веществе.

Ключевые слова: органическое вещество, битумоиды, баженовская свита, катагенез, фенантроны, ароматические соединения, Западная Сибирь.

Для цитирования: Сотнич И.С., Костырева Е.А. Особенности распределения фенантронов в аквагенном органическом веществе баженовской свиты Западной Сибири // Нефтегазовая геология. Теория и практика. - 2024. - Т.19. - №2. - https://www.ngtp.ru/rub/2024/9_2024.html EDN: NOAPCK

В последнее время при проведении геохимических исследований органического вещества (ОВ) нефтематеринских пород и нефтей всё большее внимание уделяется изучению состава их ароматических фракций ([Каширцев и др., 2018; Бурдельная, Бушнев, 2021; Сотнич, Костырева, 2021; Долженко, Фомин, 2022] и др.). Среди ароматических соединений особое внимание привлекают широко распространенные в битумоидах и нефтях трициклические ароматические углеводороды со структурой фенантрена. Соотношения этих соединений, в частности, метилфенантронов, широко используются в качестве показателей зрелости ОВ, поскольку в структуре фенантрена с ростом катагенеза интенсивно проходят процессы алкилирования и изомеризации [Radke et al., 1982; Radke, 1988; Чахмахчев, 1989; Чахмахчев, Чахмахчев, 1995; Budzinski et al., 1995]. В практике геохимических исследований традиционно используются соотношения метилфенантронов (МФ), а именно соотношение их α - и β -замещенных структур. Считается, что по мере увеличения степени катагенеза происходит уменьшение концентраций α -изомеров (1- и 9-МФ) и повышение концентраций более

термически стабильных β -изомеров (2- и 3-МФ) [Radke et al., 1982; Radke, 1988; Budzinski et al., 1995].

Использование фенантроновых параметров в качестве критериев степени зрелости ОБ для нафтидов, связанных с аквагенным (морским) ОБ, может быть не всегда достоверным [Radke, Welte, Willsch, 1986; Cassini et al., 1988; Budzinski et al., 1995] и требует калибровки для конкретного района с определенным объектом исследования, поскольку на низких стадиях катагенеза (в диапазоне значений отражательной способности витринита $R_o^{vt}=0,5-0,7\%$) распределение изомеров метилфенантронов отражает структуру керогена, из которого они образовались, а различия в термической стабильности изомеров не имеют значения [Radke, 1988].

Вместе с тем, помимо голоядерного фенантрена и его метилзамещенных изомеров в ароматических фракциях битумоидов и нефтей идентифицируются и другие соединения фенантронового ряда [Бурдельная, Бушев, 2021; Сотнич, Костырева, 2021; и др.], содержание и распределение которых изучено в меньшей степени.

Цель исследования – установить закономерности распределения фенантронов в аквагенном ОБ, выявить влияние на них обстановок осадконакопления, зрелости и миграционных процессов. Задача исследования - идентификация и сравнительный анализ распределения фенантроновых соединений в хлороформенных экстрактах из открытого и закрытого порового пространства баженновской свиты Западной Сибири.

Материалы и методы исследований

Исследования проводились по разработанной в ИНГГ СО РАН методике [Конторович и др., 2018], согласно которой последовательной экстракцией из породы извлекались сначала битумоиды открытых пор (из образцов регулярной формы (ОРФ – кубики и цилиндры), из образцов грубого дробления (ОГД – 0,5 см)), затем битумоиды из закрытого порового пространства пород (из образцов мелкого дробления (ОМД-0,25 мм)). Более детально методика исследований описана в опубликованных работах [Конторович и др., 2018; Сотнич, Костырева, 2021; Сотнич и др., 2023].

Экстракция битумоидов выполнялась хлороформом при комнатной температуре в стеклянных стаканах (ОРФ - кубики и цилиндры) и с помощью центрифугирования (ОГД – 0,5 см, ОМД – 0,25 мм). Фракция ароматических соединений выделена смесью петролейного эфира и бензола (9:1) в хроматографической колонке длиной 40-70 см, забитой силикагелем марки АСК с величиной зерен 0,2-0,5 мкм. Хромато-масс-спектрометрические (ХМС) исследования проводились на газовом хроматографе Agilent Technologies 6890 с кварцевой капиллярной колонкой HP-5ms длиной 30 м и внутренним диаметром 0,25 мм (неполярная

фаза – 5%-фенил, 95%-метилполисилоксан, толщина нанесения – 0,25 мкм) и с масс-селективным детектором Agilent 5973N. Температурный режим – 100–320 °С, нагрев со скоростью 4 °С/мин, газ-носитель – гелий, энергия ионизации – 70 eV. Идентификация соединений осуществлялась по характерным осколочным ионам m/z : 178 (голаядерный фенантрен), 192 (метилфенантрены), 206 (диметилфенантрены), 220 (триметилфенантрены) (режим SIM – selected ion monitoring) по времени удерживания путем сравнения полученных масс-фрагментограмм с библиотекой NIST и опубликованными данными. Среди триметилфенантронов по фрагментарным ионам $m/z=223$ и $M+238$ идентифицировано соединение 1,1,7,8-тетраметил-1,2,3,4-тетрагидрофенантрен (ТМТГФ), а по $m/z=219$ и $M+234$ – соединение 1-метил,7-изопропилфенантрен (ретен), который характерен как для ОБ континентальных и прибрежно-морских отложений, начиная с каменноугольного периода (образование из смол хвойных растений), так и для аквагенного ОБ (некоторые виды фитопланктона) [Каширцев и др., 2018]. Количественная оценка относительных концентраций идентифицированных соединений фенантренового ряда проведена по площадям пиков, за 100% принята сумма всех идентифицированных соединений.

В качестве объекта исследования выбрано ОБ баженовской свиты из керна скважин Арчинская-47, Западно-Квензерская-4 и Южно-Майская-413 Нюрольского района, расположенного в юго-восточной части Западной Сибири (рис. 1).

Коллекция кернового материала включала 240 образцов, из которых 70 образцов Арчинской площади (34 ОРФ+17 ОГД+18 ОМД), 64 образца Западно-Квензерской площади (22 ОРФ+21 ОГД+21 ОМД) и 107 образцов Южно-Майской площади (25 ОРФ+41 ОГД+41 ОМД). В баженовское время ОБ Нюрольского района накапливалось в зоне мелкого моря с глубинами 100-200 м [Конторович и др., 2013].

Для понимания влияния обстановок накопления аквагенного ОБ на распределение фенантронов будут использованы результаты изучения ароматических соединений битумоидов баженовской свиты центральной части Западной Сибири (скв. Повховская-70, Дружная-322, Новоортьягунская-187, Южно-Ягунская-306) [Сотнич, Костырева, 2021], где глубины баженовского моря достигали 400 м [Конторович и др., 2013].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Распределение фенантронов в органическом веществе баженовской свиты

В ароматической фракции битумоидов баженовской свиты Нюрольского района Западной Сибири содержание трициклических ароматических углеводородов фенантренового ряда варьирует в широких пределах: от 35 до 85% от суммы идентифицированных ароматических соединений (здесь и далее по тексту \sum аром. соед.) – фенантронов, дибензотиофенов, моно- и

триароматических стероидов (рис. 2).

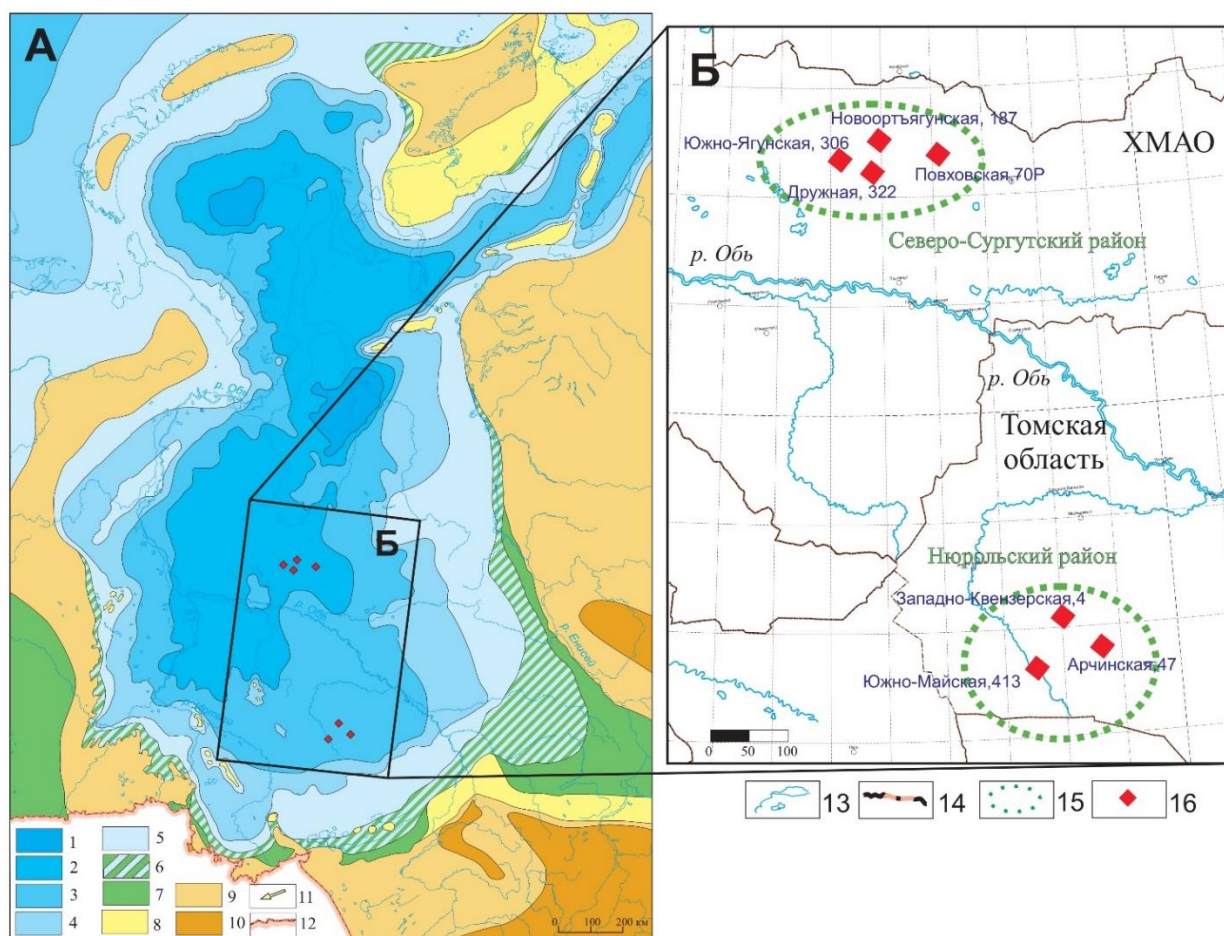


Рис. 1. Обзорная схема точек отбора образцов на палеографической схеме Западной Сибири, волжский век (А) (по [Конторович и др., 2013]) и в районах исследования (Б)

1 - глубина моря более 400 м, 2 - глубина моря 200-400 м, 3 - глубина моря 100-200 м, 4 - глубина моря 25-100 м, 5 - глубина моря менее 25 м, 6 - равнина прибрежная, временами заливавшаяся морем (осадки пойменные, озерно-болотные, русловые, дельтовые, береговых баров, пляжевые); 7 - равнина низменная, аккумулятивная (осадки русел, пойм, озер и др.); 8 - равнина денудационно-аккумулятивная; 9 - равнина возвышенная (денудационная суша), 10 - горы низкие; 11 - главные направления сноса обломочного материала, 12 - государственная граница, 13 - реки и акватории, 14 - административные границы, 15 - районы исследования, названия по [Конторович и др., 2018], 16 - скважины отбора керна.

Наибольшие концентрации фенантронов отмечаются в битумоидах Западно-Квензерской площади – от 51,6 до 85,4% от Σ аром. соед., в среднем 80%. На Южно-Майской площади содержание фенантронов варьирует от 43,8 до 79,0% (в среднем 59,2%), на Арчинской – от 36,8 до 69,0% (в среднем, 47,5%). В целом, концентрации фенантронов в общем содержании ароматических соединений на юго-востоке Западной Сибири несколько выше по сравнению с центральными районами Западной Сибири (Северо-Сургутский район), где на долю фенантронов приходится в основном 40-60% от Σ аром. соед. [Сотнич, Костырева, 2021]. При этом наибольшие концентрации фенантронов в битумоидах баженовской свиты Северо-Сургутского района уменьшаются в ряду: Повховская (в среднем 61,3%) →

Новоортьягунская (58,3%) → Дружная (56,8%) → Южно-Ягунская (44,5%) площади. Таким образом, содержание фенантронов в аквагенном ОВ баженовской свиты - достаточно высокое, независимо от обстановок его накопления, хотя в ОВ юго-востока Западной Сибири содержание фенантронов - в целом выше, по сравнению с центральными районами.

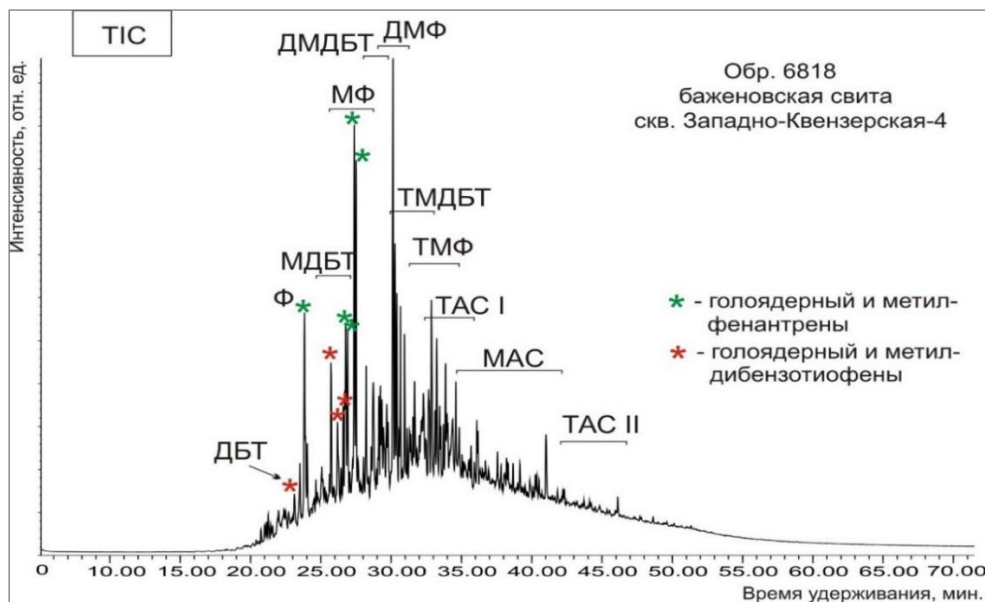


Рис. 2. Распределение ароматических соединений в нефтено-ароматической фракции битумоидов баженовской свиты Западно-Квензерской площади

Фенантроны: Φ - голаядерный, МΦ - метил-, ДМΦ - диметил-, ТМΦ - триметил-; дибензотиофены: ДБТ - голаядерный, МДБТ - метил-, ДМДБТ - диметил-, ТМДБТ - триметил-; ароматические стероиды: МАС - моноароматические, ТАС I - низкомолекулярные триароматические, ТАС II - высокомолекулярные триароматические.

Анализ результатов распределения идентифицируемых ароматических соединений фенантронового ряда показал, что в составе битумоидов баженовской свиты Нюрольской мегавпадины в наибольших концентрациях присутствуют либо голаядерный фенантрен и метилфенантроны, либо метил- и диметилфенантроны (табл. 1, рис. 3).

Доминирование голаядерного фенантрена и метилфенантронов отмечается в битумоидах Арчинской и Южно-Майской площадей, где их концентрация достигает 46,9 и 36,5% от Σ фенантронов; 42,2 и 40,4% соответственно. Содержание (ДМΦ) в них изменяется от 11,0 до 19,3% и 14,3÷26,8%, триметилфенантронов (ТМΦ) – от 4,0 до 8,6% и 6,0÷13,1% соответственно.

В битумоидах Западно-Квензерской площади распределение фенантронов существенно отличается – среди фенантронов преобладают метил- и диметилфенантроны (до 41,9 и 41,6% соответственно). Содержание голаядерного фенантрена не превышает 21,5%, а триметилфенантронов возрастает до 24,5%. Можно отметить, что с ростом содержания метилзамещенных структур содержание голаядерного фенантрена снижается.

Таблица 1

Изменение содержания ароматических соединений фенантренового ряда в битумоидах баженовской свиты с ростом зрелости органического вещества

Скважина	Зрелость ОВ			Концентрации, в % от \sum фенантронов					
	T_{\max} , °С	R_{vt}^0 , %	Градация катагенеза	Фенантрен	\sum МФ	\sum ДМФ	\sum ТМФ	ТМТГФ	Ретен
Нюрольский район (Томская область)									
Арчинская-47	422	0,62	ПК ₃ -МК ₁ ¹	29,5	34,4	16,5	6,9	10,1	2,7
Южно-Майская-413	423	0,65	ПК ₃ -МК ₁ ¹	27,5	35,8	18,2	8,0	7,0	3,5
Западно-Квензерская-47	443	0,78	МК ₁ ²	15,7	38,3	33,0	13,1	0	0
Северо-Сургутский район (север ХМАО)									
Южно-Ягунская-306	438	0,73	МК ₁ ¹ -МК ₁ ²	18,2	37,0	26,1	15,6	1,9	1,2
Дружная-322	440	0,76	МК ₁ ²	17,8	39,2	27,5	14,7	0,3	0,6
Новоортьягунская-187	439	0,68	МК ₁ ²	13,4	34,3	30,2	20,1	0,7	1,3
Повховская-70	442	0,73	МК ₁ ²	10,1	35,2	33,3	20,5	0,2	0,7

Примечания: в таблице указаны средние значения T_{\max} и концентраций ароматических соединений фенантренового ряда. Пиролитические исследования по методу Rock Eval проводились на анализаторе Source Rock Analyzer (SRA) - TPH/TOC (Weatherford Laboratory, Instr. Division), результаты частично опубликованы в работах [Костырева, Сотнич, 2017; Замирайлова и др., 2019; Рыжкова и др., 2022]. Значения R_{vt}^0 приведены по данным А.Н. Фомина, определения проводились в единичных образцах по отражательной способности псевдовитринита, с пересчетом на витринит [Фомин, 2011].

МФ - метилфенантрены, ДМФ - диметилфенантрены, ТМФ - триметилфенантрены, ТМТГФ - 1,1,7,8-тетраметил-1,2,3,4-тетрагидрофенантрен; T_{\max} - температура максимального выхода УВ при крекинге керогена, определяемая при пиролизе пород; R_{vt}^0 - значения отражательной способности витринита. Градации катагенеза указаны по шкале индексов А.Э. Конторовича (1976 г.).

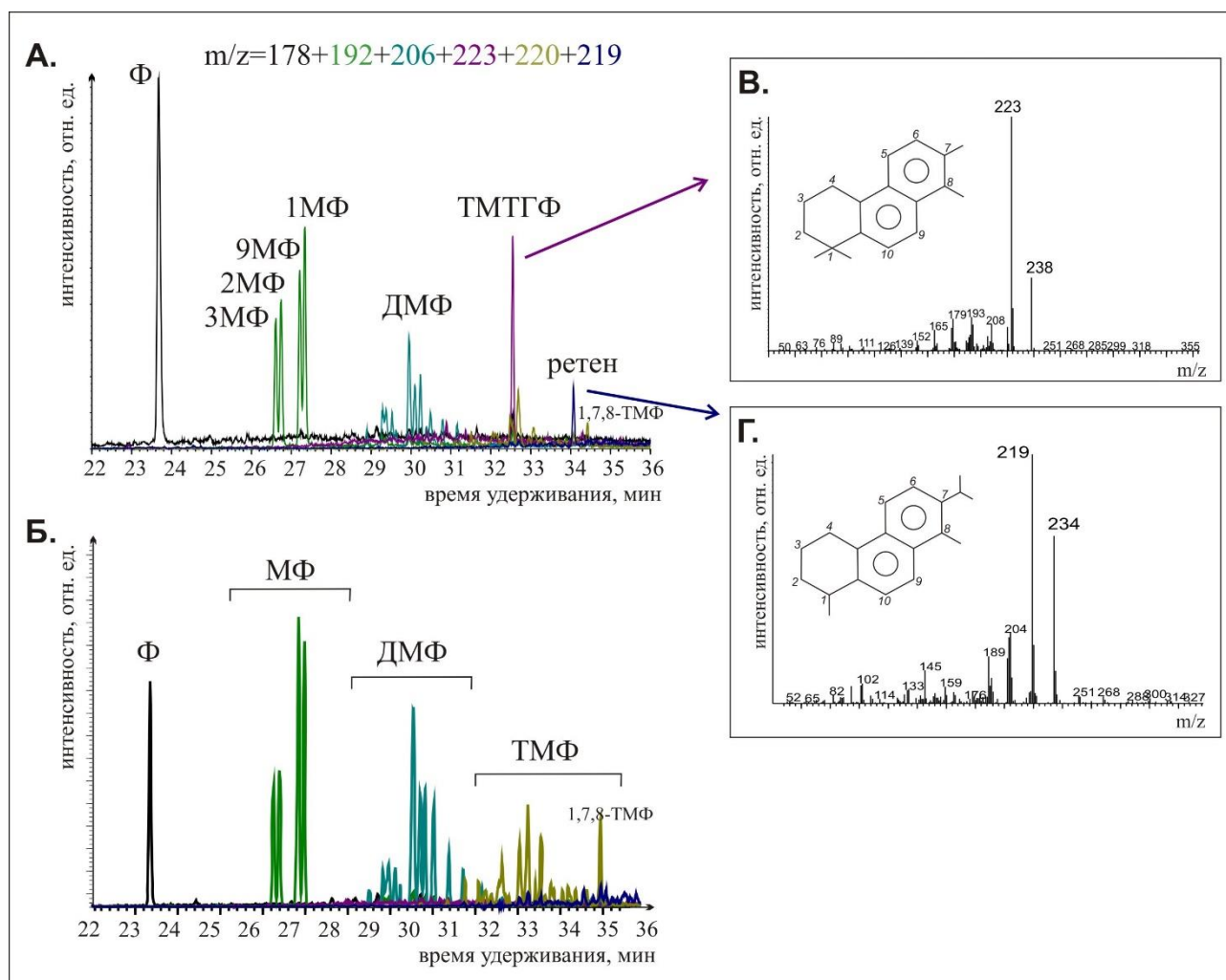


Рис. 3. Распределение ароматических соединений фенантренового ряда в битумоидах баженовской свиты Арчинской (А) и Западно-Квензерской (Б) площадей

Масс-спектры: В - 1,1,7,8-тетраметил-1,2,3,4-тетрагидрофенантрена; Г - 1-метил,7-изопропилфенантрена.

Ф - голаядерный фенантрен, МФ - метилфенантрены, ДМФ - диметилфенантрены, ТМФ - триметилфенантрены, ТМТГФ - 1,1,7,8-тетраметил-1,2,3,4-тетрагидрофенантрен, ретен - 1-метил,7-изопропилфенантрен.

Такое изменение в распределении фенантреновых соединений в пределах одного района объясняется прежде всего степенью катагенетической преобразованности ОВ. Согласно проведенным углепетрографическим исследованиям (данные А.Н. Фомина) ОВ баженовской свиты в Нюрольском районе характеризуется разной степенью зрелости: на Западно-Квензерской площади зрелость ОВ соответствует градации катагенеза МК₁² ($R_{vt}^0 = 0,78\%$), на Южно-Майской и Арчинской – МК₁¹ ($R_{vt}^0 = 0,62-0,65\%$). Согласно пиролитическим определениям, значения T_{max} в изучаемых образцах изменяются от 421 до 425°C (Арчинская и Южно-Майская) и 440÷447°C (Западно-Квензерская), что соответствует грациям катагенеза ПК₃-МК₁¹ и МК₁² соответственно [Гончаров и др., 2013].

Распределение фенантреновых соединений в битумоидах баженовской свиты Северо-Сургутского района подтверждает эту закономерность. Зрелость ОВ на этой территории

изменяется по данным витринита в пределах градации катагенеза MK_1^2 ($R^{vt} = 0,68-0,76\%$), по пиролитическим данным – $MK_1^1-MK_1^2$ ($T_{max} = 434\div 445^\circ C$), при этом отмечается увеличение преобразованности ОВ в ряду Южно-Ягунская ($T_{max} = 434\div 442^\circ C$) → Новоортьягунская ($T_{max} = 436\div 442^\circ C$) → Дружная ($T_{max} = 437\div 443^\circ C$) → Повховская ($T_{max} = 439\div 445^\circ C$) площади. В составе фенантронов, в образцах баженовской свиты Северо-Сургутского района преобладают метил- и диметилфенантроны [Сотнич, Костырева, 2021], содержание которых изменяется от 20 до 40% от Σ фенантронов. При этом, с ростом степени преобразованности ОВ содержание диметилфенантронов увеличивается (в среднем с 26,1% на Южно-Ягунской площади до 33,3% на Повховской площади), а концентрации голядерного фенантрена, наоборот, снижаются (с 18,2 до 10,1% соответственно). Содержание триметилфенантронов с ростом катагенеза также увеличивается – в среднем с 15,6% на Южно-Ягунской площади до 20,5% на Повховской площади (см. табл. 1).

Стоит также отметить, что в незрелом/слабозрелом ОВ баженовской свиты идентифицируются 1,1,7,8-тетраметил-1,2,3,4-тетрагидрофенантрен (ТМТГФ) и ретен (см. рис. 3). В наибольших концентрациях эти соединения встречаются в битумоидах баженовской свиты Арчинской площади (ТМТГФ – до 19% от Σ фенантронов (в среднем 10,1%), ретен – до 4,7% от Σ фенантронов) (в среднем, 2,7%). На Южно-Майской площади содержание ТМТГФ в битумоидах достигает 12,5% от Σ фенантронов (в среднем 7,0%), ретен – до 8,1% (в среднем 3,5%). В образцах Южно-Ягунской площади содержание ТМТГФ уже не превышает 3,7% (в среднем 1,9%), в Новоортьягунской, Дружной и Повховской площадях – не более 1,5% (в среднем 0,7, 0,3 и 0,2% соответственно). В наиболее зрелом ОВ баженовской свиты Западно-Квензерской площади эти два ароматических соединения не идентифицируются. Согласно опубликованным данным, ТМТГФ – частично гидрированный триметилзамещенный фенантрен – считается промежуточным продуктом преобразования трициклических терпанов, из которых в процессе катагенеза путем последовательной ароматизации насыщенных колец образуется 1,2,8-триметилзамещенный фенантрен ([Каширцев и др., 2018; Бурдельная, Бушнева, 2021] и др.). В этой связи отсутствие соединения ТМТГФ в зрелом ОВ свидетельствует о завершении ароматизации насыщенного кольца в структуре ТМТГФ и формировании устойчивого 1,2,8-триметилфенантрена. Происхождение ретена связывают с частичной деградацией абиетиновой кислоты – основного компонента смол хвойных растений, однако присутствие этого соединения в ОВ древних вендских и кембрийских отложений предполагают и другие источники [Каширцев и др., 2018]. Причина исчезновения ретена с ростом зрелости ОВ пока неясна, требуются дальнейшие исследования и наблюдения.

Фенантреновые показатели зрелости органического вещества

Для изученной коллекции рассчитаны значения наиболее известных и широко используемых молекулярных показателей на основе распределения метилфенантронов, таких как метилфенантреновые индексы $MPI = 1,5 \cdot (2M\Phi + 3M\Phi) / (0,69 \cdot \Phi + 1M\Phi + 9M\Phi)$ [Radke et al., 1982], $MPI-1 = 1,89 \cdot (2M\Phi + 3M\Phi) / (\Phi + 1,26 \cdot (1M\Phi + 9M\Phi))$ [Cassani et al., 1988], $MPI-2 = (2M\Phi + 3M\Phi) / (\Phi + 1M\Phi + 9M\Phi)$ [Колесников и др., 1991], фенантреновые параметры $PP-1 = 1M\Phi / (2M\Phi + 3M\Phi)$ [Alexander et al., 1986], $PP-1_{mod} = (1M\Phi + 9M\Phi) / (2M\Phi + 3M\Phi)$ [Cassani et al., 1988], фенантреновый индекс $ФИ = 2M\Phi / \Phi$ ([Конторович и др., 2004] и др.).

Анализ значений всех вышеперечисленных показателей в битумоидах Западно-Квензерской, Южно-Майской и Арчинской площадей и сопоставление с термической зрелостью образцов, определенных по методу пиролиза Rock Eval (значения T_{max}), показало, что не все из них информативны в качестве показателей зрелости ОВ баженовской свиты (рис. 4). По-видимому, это связано с тем, что перегруппировка метильных заместителей метилфенантронов из α - в β -положение, обусловленная их термодинамической стабильностью, начинает играть ведущую роль лишь после градации катагенеза MK_2 [Radke, 1988; Cassani et al., 1988; Szczerba, Rospondek, 2010].

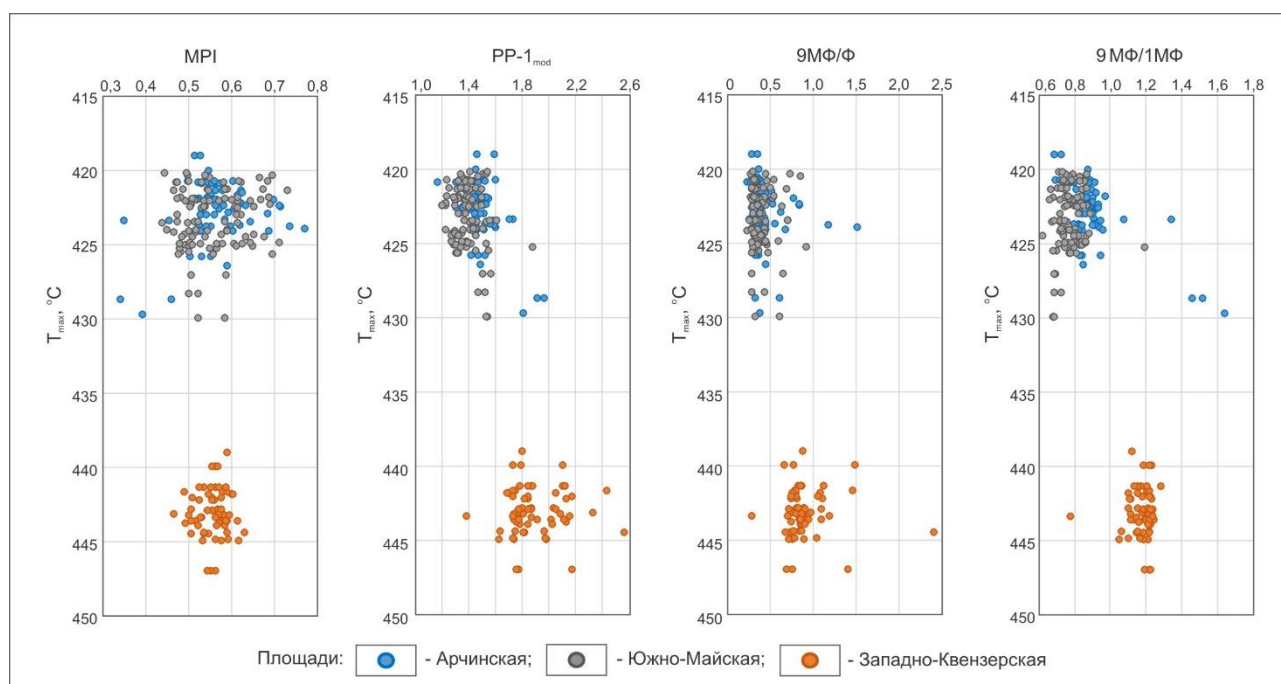


Рис. 4. Зависимость фенантреновых молекулярных показателей от T_{max}

Значения пиролитического параметра T_{max} определены в неэкстрагированных породах.

Так, в большинстве Западно-Квензерских образцов значения MPI и $MPI-1$ варьируют в пределах 0,5-0,6 (88 и 83% коллекции), $MPI-2$ - в пределах 0,3-0,35 (83% коллекции). В Арчинских и Южно-Майских образцах значения MPI преимущественно изменяются от 0,5-

0,65 (81 и 64% соответствующих коллекций), МРІ-1 - от 0,45 до 0,6 (81 и 75% коллекции), МРІ-2 - от 0,35 до 0,4 (88 и 94% коллекции). В целом, значения метилфенантроновых индексов МРІ, МРІ-1 и МРІ-2 в изученных битумоидах сопоставимы несмотря на то, что степень преобразованности ОВ баженовской свиты в этих образцах существенно отличается.

Значения параметров РР-1 и РР-1_{mod} по сравнению с метилфенантроновыми индексами показывают более выраженное изменение с ростом катагенеза, из них РР-1_{mod} для изучаемой коллекции информативнее. Значения РР-1 в образцах Западно-Квензерской площади - несколько выше (в 95% коллекции преимущественно 0,7-1) по сравнению с образцами Арчинской и Южно-Майской площадей (0,7-0,9 в 93 и 81% коллекции соответственно). Значения РР-1_{mod} изменяются преимущественно от 1,2 до 1,6 в образцах Арчинской (91% коллекции) и Южно-Майской (97% коллекции) площадей и от 1,7 до 2 и более в образцах Западно-Квензерской площади (92% коллекции). Для сравнения, в ранее проведенных исследованиях битумоидов баженовской свиты Северо-Сургутского района наиболее высокие значения показателей РР-1_{mod} (до 1,1 и 2,2 и более соответственно) характерны для наиболее преобразованных образцов Повховской и Новоуртьягунской площадей [Сотнич, Костырева, 2021]. Таким образом, особенностью аквагенного ОВ баженовской свиты является доминирование α -изомеров (1- и 9-МФ) над β -структурами (2- и 3-МФ), которое становится еще более выраженным с ростом катагенеза (до градации катагенеза МК₁²). Такое распределение наблюдается и для континентального ОВ, в котором 9МФ доминирует над другими изомерами в диапазоне зрелости R^o_{vt} до 1,2% [Szczerba, Rospondek, 2010].

Как отмечено ранее, в зависимости от зрелости ОВ в составе ароматической фракции битумоидов меняется содержание голядерного фенантрена, что сказывается на соотношении метилфенантронов к фенантрону: 3МФ/Ф, 2МФ/Ф, 9МФ/Ф и 1МФ/Ф. Значения этих показателей в образцах Арчинской и Южно-Майской площадей близки и изменяются, в основном, в пределах 0,2-0,4 для 3МФ/Ф и 2МФ/Ф, 0,3-0,6 - для 9МФ/Ф и 1МФ/Ф. В битумоидах Западно-Квензерской площади значения этих показателей в 1,5-2 раза выше и варьируют преимущественно 0,3-0,5 для 3МФ/Ф, 0,4-0,6 - для 2МФ/Ф, 0,7-1 - для 9МФ/Ф, 0,6-0,9 - для 1МФ/Ф. Наибольшие отличия в значениях наблюдаются по отношению 9МФ/Ф (см. рис. 4). Соотношение 9МФ/1МФ также существенно отличается в зрелом и незрелом ОВ: в образцах Арчинской и Южно-Майской площадей значения показателя, как правило, не превышают 0,9, в то время как на Западно-Квензерской площади 9МФ/1МФ - в основном ≥ 1 .

Помимо метилфенантроновых (РР-1_{mod}, 2МФ/Ф, 9МФ/Ф, 1МФ/Ф, 9МФ/1МФ) параметров, информативным показателем зрелости показало себя соотношение ТМТГФ и 1,7,8-ТМФ, предложенное в работе [Бурдельная, Бушнев, 2021]. В образцах баженовской свиты Ньюольского района значения этого показателя изменяются преимущественно от 5 до

9 в образцах Арчинской площади (в среднем 7,2), от 3 до 6 в образцах Южно-Майской площади (в среднем 4,2) и снижаются до 0 в образцах Западно-Квензерской площади. Диапазон значений T_{\max} в образцах, в которых идентифицируется соединение ТМТГФ, в изученной коллекции битумоидов составляет 420-430°C, и отсутствует, начиная с $T_{\max} \sim 440^\circ\text{C}$. Таким образом, полученные результаты полностью совпадают с данными, приведенными ранее [Бурдельная, Бушнев, 2021], согласно которым преобладание ТМТГФ над 1,7,8-ТМФ (1,2,8-ТМФ) характерно для незрелого ОВ на градации катагенеза ПК₃-МК₁ (или ПК₃-МК₁¹ по шкале Конторовича), в начале градации МК₁ ($T_{\max} \sim 428^\circ\text{C}$) соотношение этих соединений меняется в пользу 1,7,8-ТМФ, далее с ростом катагенеза ($T_{\max} \sim 432-440^\circ\text{C}$) концентрации гидрированного аналога резко снижается, а затем полностью исчезает ($T_{\max} \sim 440-444^\circ\text{C}$).

Влияние миграционных процессов на фенантроновые показатели зрелости органического вещества

Для оценки влияния миграционных процессов на значения фенантроновых показателей зрелости ОВ проведен их сравнительный анализ в экстрактах из недробленной породы (ОРФ – образцы регулярной формы) и образцов грубого дробления (ОГД), т.е. битумоидов из открытого порового пространства пород («свободная микронепть»), а также в экстрактах образцов мелкого дробления (ОМД), т.е. битумоидов закрытых пор («заблокированные» автохтонные битумоиды).

Анализ значений фенантроновых показателей зрелости ОВ в битумоидах открытых (из ОРФ и ОГД) и закрытых (из ОМД) пор показал, что для слабо преобразованного ОВ Арчинской и Южно-Майской площадей значения рассчитанных показателей в битумоидах открытых (ОГД, ОРФ) и закрытых (ОМД) пор идентичны (табл. 2). В преобразованном ОВ баженовской свиты Западно-Квензерской площади отмечаются наибольшие отличия в показателях 9МФ/Ф, 1МФ/Ф, РР-1 и РР-1_{mod.}, значения которых повышены в автохтонных битумоидах, «заблокированных» в закрытом поровом пространстве пород (см. табл. 2, рис. 5). Так значения отношения 9МФ/Ф в битумоидах открытых пор на Западно-Квензерской площади, как правило, не превышают 1 (в среднем 0,8), а в битумоидах закрытых пор достигают 2,5 (в среднем 1,1). Отношение 1МФ/Ф в битумоидах ОРФ и ОГД изменяется от 0,5 до 0,8 (в среднем 0,7), а в битумоидах ОМД возрастает до 1,2 (в среднем 0,9). При этом соотношение 9МФ и 1МФ в битумоидах открытых и закрытых пор остается неизменным: 1÷1,3, в среднем - 1,2. Таким образом, под влиянием первично-миграционных процессов либо снижаются концентрации 9МФ и 1МФ, либо увеличивается концентрация голоядерного фенантрена. Такая закономерность, по-видимому, связана с большей миграционной способностью голоядерного фенантрена по сравнению с его митилзамещенными гомологами,

несмотря на то, что в целом миграционная способность этого класса соединений очень низкая [Жильцова, Исаев, Коржов, 2013]. Значения отношений 2МФ/Ф и 3МФ/Ф в битумоидах открытых и закрытых пор остается практически неизменными и колеблется от 0,2 до 0,7 и от 0,2 до 0,6 соответственно. Значения PP-1 и PP-1_{mod} в битумоидах открытых пор в образцах Западно-Квензерской площади варьируют в пределах 0,7÷0,9 и 1,6÷1,9 соответственно (в среднем 0,8 и 1,8), в битумоидах закрытых пор – 0,9÷1,2 и 1,9÷2,5 соответственно (в среднем 1,0 и 2,1). Это также свидетельствует о том, что в процессе первичной миграции концентрации 9МФ и 1МФ уменьшаются.

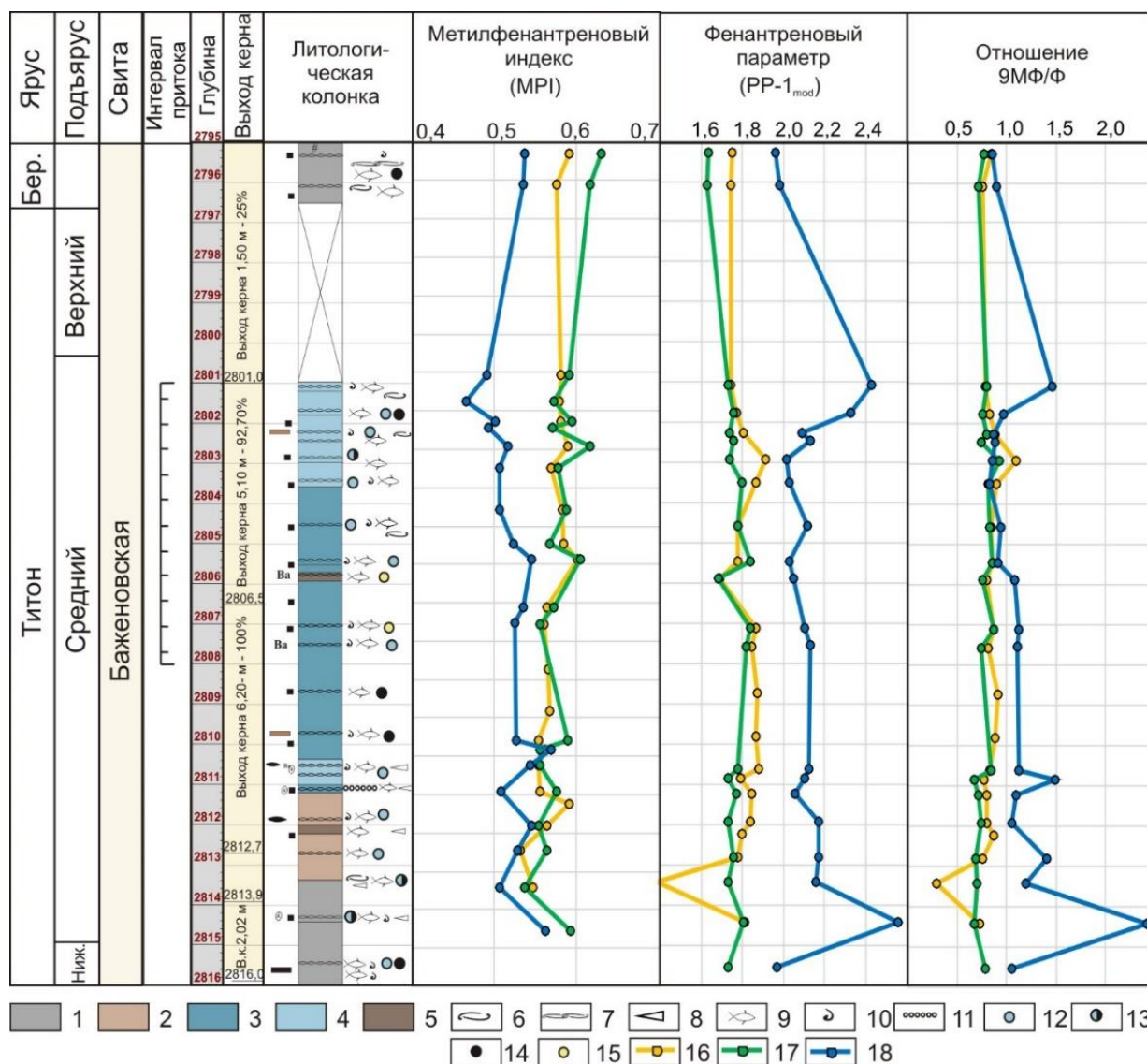


Рис. 5. Геохимический разрез баженовской свиты скв. Западно-Квензерская-4

Литологический состав пород по [Эдер и др., 2022], литологическая колонка по [Рыжкова и др., 2022]: 1 - микстит глинисто-кремнистый, кремнисто-глинистый; 2 - микстит кремнистый; 3 - микстит кероген-кремнистый; 4 - силицит, силицит керогеновый; 5 - доломит; 6 - двустворки; 7 - прослои двустворок; 8 - белемниты; 9 - костные остатки рыб; 10 - крючки онихитес; 11 - прослои радиоларита; радиоларии, выполненные: 12 - кремнеземом, 13 - кремнеземом, частично, замещенные пиритом, 14 - пиритом, 15 - кальцитом; значения молекулярных показателей в битумоидах открытых пор: 16 - ОРФ, 17 - ОГД, в битумоидах закрытых пор: 18 - ОМД.

Таблица 2

Значения фенантроновых показателей зрелости органического вещества в битумоидах из открытого и закрытого порового пространства пород баженовской свиты Нюрольского района

Тип порового пространства	Битумоиды	3МФ/Ф	ФИ (2МФ/Ф)	9МФ/Ф	1МФ/Ф	9МФ/1МФ	MPI	MPI-2	PP-1	PP-1 _{mod}
Арчинская площадь										
открытое	ОРФ	0,2-0,6 / 0,3	0,2-0,4 / 0,3	0,3-0,6 / 0,4	0,3-0,6 / 0,5	0,8-1 / 0,9	0,5-0,75 / 0,6	0,25-0,45 / 0,3	0,7-0,9 / 0,8	1,3-1,6 / 1,5
	ОГД	0,2-0,4 / 0,2	0,2-0,4 / 0,3	0,2-0,5 / 0,3	0,3-0,6 / 0,4	0,7-0,9 / 0,9	0,45-0,65 / 0,5	0,25-0,35 / 0,3	0,7-0,9 / 0,8	1,3-1,6 / 1,5
закрытое	ОМД	0,1-0,3 / 0,2	0,1-0,4 / 0,3	0,2-0,5 / 0,3	0,2-0,6 / 0,4	0,7-1 / 0,9	0,4-0,65 / 0,5	0,1-0,35 / 0,3	0,6-1,0 / 0,8	1,3-1,6 / 1,5
Южно-Майская площадь										
открытое	ОРФ	0,2-0,5 / 0,3	0,3-0,6 / 0,4	0,3-0,6 / 0,4	0,4-0,8 / 0,5	0,7-0,9 / 0,8	0,5-0,75 / 0,6	0,25-0,45 / 0,4	0,6-0,9 / 0,8	1,2-1,6 / 1,4
	ОГД	0,2-0,5 / 0,3	0,2-0,6 / 0,3	0,2-0,5 / 0,3	0,3-0,7 / 0,5	0,6-0,9 / 0,8	0,45-0,6 / 0,5	0,25-0,45 / 0,3	0,6-1,0 / 0,8	1,2-1,6 / 1,4
закрытое	ОМД	0,2-0,4 / 0,2	0,2-0,5 / 0,3	0,2-0,5 / 0,3	0,3-0,5 / 0,4	0,6-0,9 / 0,8	0,45-0,7 / 0,6	0,25-0,4 / 0,3	0,6-1,0 / 0,8	1,2-1,6 / 1,4
Западно-Квензерская площадь										
открытое	ОРФ	0,2-0,5 / 0,4	0,2-0,7 / 0,5	0,7-1 / 0,8	0,6-0,8 / 0,7	1,1-1,3 / 1,2	0,5-0,65 / 0,6	0,25-0,4 / 0,3	0,7-0,9 / 0,8	1,6-1,9 / 1,8
	ОГД	0,3-0,5 / 0,4	0,3-0,6 / 0,5	0,6-1 / 0,8	0,5-0,8 / 0,7	1,0-1,3 / 1,2	0,5-0,65 / 0,6	0,3-0,4 / 0,3	0,7-0,9 / 0,8	1,6-1,9 / 1,8
закрытое	ОМД	0,3-0,6 / 0,4	0,3-0,7 / 0,5	0,8-2,5 / 1,1	0,7-1,2 / 0,9	1,1-1,3 / 1,2	0,45-0,6 / 0,5	0,25-0,35 / 0,3	0,9-1,2 / 1,0	1,9-2,5 / 2,1

Примечания: Ф - голаядерный фенантрен; МФ - изомеры метилфенантронов (1-, 2-, 3-, 9-); метилфенантроновые индексы (Methylphenanthrene Index - MPI): $MPI = 1,5 \cdot (2МФ + 3МФ) / (0,69 \cdot Ф + 1МФ + 9МФ)$ [Radke et al., 1982]; $MPI-2 = (2МФ + 3МФ) / (Ф + 1МФ + 9МФ)$; Phenanthrene parameter $PP-1 = 1МФ / (2МФ + 3МФ)$ [Alexander et al., 1986]; $PP-1_{modified} = (1МФ + 9МФ) / (2МФ + 3МФ)$ [Cassani et al., 1988]. Разброс значений: (min-max)/среднее.

Заключение

Таким образом, на основе результатов изучения распределения ароматических соединений фенантренового ряда в аквагенном ОВ баженовской свиты Нюрольской мегавпадины можно сделать следующие выводы:

1. С ростом зрелости ОВ в составе нефтено-ароматической фракции битумоидов баженовской свиты возрастает содержание соединений фенантренового ряда, при увеличении в нем концентраций моно-, ди- и триметилзамещенных структур (см. табл. 1). Тенденция прослеживается для ОВ как юго-восточных, так и центральных районов Западной Сибири.
2. Среди метилфенантронов в ароматической фракции битумоидов баженовской свиты и в зрелом ($МК_1^2$), и в незрелом ($ПК_3-МК_1^1$) ОВ α -замещенные структуры (9- и 1-метилфенантроны) доминируют над β -изомерами (2- и 3-метилфенантроны), причем с ростом катагенеза их соотношение увеличивается (см. рис. 3).
3. В битумоидах баженовской свиты с низкой степенью преобразованности (до градации катагенеза $МК_1^2$) идентифицируется соединение 1,1,7,8-тетраметил-1,2,3,4-тетрагидрофенантрен – предшественник 1,2,8 – триметилфенантрена (см. рис. 3).
4. Для аквагенного ОВ баженовской свиты в главной зоне нефтеобразования основными показателями степени катагенеза являются $PP-1_{mod} = (1МФ+9МФ)/(2МФ+3МФ)$, $ФИ=2МФ/Ф$ и соотношения $9МФ/1МФ$, $9МФ/Ф$ и $1МФ/Ф$ (см. табл. 2, рис. 4). Общепринятые параметры МРІ, МРІ-1, МРІ-2 неинформативны (см. табл. 2).
5. Влияние первично-миграционных процессов на фенантреновые показатели проявляется лишь в преобразованном ОВ (см. рис. 5).

Исследование нефтено-ароматической фракции битумоидов баженовской свиты Западно-Квензерской и Арчинской площадей Западной Сибири выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-77-01088 (<https://rscf.ru/project/23-77-01088/>). Изучение геохимии органического вещества Северо-Сургутского района, а также Южно-Майской площади Нюрольского района выполнено в рамках проектов ФНИ № FWZZ-2022-0011 и FWZZ-2022-0012.

Литература

- Бурдельная Н.С., Бушнев Д.А. Новый показатель зрелости в органическом веществе доманиковых отложений // Геология и геофизика. - 2021. - Т. 62. - № 2. - С. 187-196.
- Гончаров И.В., Самойленко В.В., Обласов Н.В., Фадеева С.В. Катагенез органического вещества пород баженовской свиты юго-востока Западной Сибири (Томская область) // Нефтяное хозяйство. - 2013. - № 10. - С. 32-37.
- Долженко К.В., Фомин А.Н. Информативность фенантреновых показателей зрелости

органического вещества в позднем мезокатагенезе и апокатагенезе (на примере сверхглубокой скважины Средневилюйская-27, Восточная Сибирь) // Геохимия. - 2022. - Т. 67. - № 1. - С.37-46.

Жильцова А.А., Исаев В.И., Коржов Ю.В. Вертикальная геохимическая зональность нефтегазоносных комплексов (на примере Рогожниковского и Северо-Рогожниковского месторождений) // Известия Томского политехнического университета. - 2013. - Т. 322. - № 1. - С. 69-82.

Замирайлова А.Г., Костырева Е.А., Эдер В.Г., Рыжкова С.В., Сотнич И.С. Литолого-геохимическая характеристика георгиевской, баженовской и куломзинской свит на Арчинской площади (Нюрольская впадина, Томская область) // Геология нефти и газа. - 2019. - № 3. - С. 99-113. DOI: [10.31087/0016-7894-2019-3-99-113](https://doi.org/10.31087/0016-7894-2019-3-99-113)

Каширцев В.А., Парфенова Т.М., Головкин А.К., Никитенко Б.Л., Зуева И.Н., Чалая О.Н. Биомаркеры-фенантрены в органическом веществе докембрийских и фанерозойских отложений и в нефтях Сибирской платформы // Геология и геофизика. - 2018. - Т. 59. - № 10. - С. 1720-1729.

Колесников А.Ю., Найденов О.В., Матвеева И.А. Реликтовые полициклические ароматические углеводороды как показатели условий генезиса нефтей // Нефтехимия. - 1991. - Т. 31. - № 6. - С. 723-736.

Конторович А.Э., Конторович В.А., Рыжкова С.В., Шурыгин Б.Н., Вакуленко Л.Г., Гайдебурова Е.А., Данилова В.П., Казаненков В.А., Ким Н.С., Костырева Е.А., Москвин В.И., Ян П.А. Палеогеография Западно-Сибирского осадочного бассейна в юрском периоде // Геология и геофизика. - 2013. - Т. 54. - № 8. - С. 972-1012.

Конторович А.Э., Костырева Е.А., Родякин С.В., Сотнич И.С., Ян П.А. Геохимия битумоидов баженовской свиты // Геология нефти и газа. - 2018. - № 2. - С. 79-88.

Конторович А.Э., Меленевский В.Н., Иванова Е.Н., Фомин А.Н. Фенантрены, ароматические стераны и дибензотиофены в юрских отложениях Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна и их значение для органической геохимии // Геология и геофизика. - 2004. - Т. 45. - № 7. - С. 873-883.

Костырева Е.А., Сотнич И.С. Геохимия органического вещества баженовской свиты севера Хантейской антеклизы // Геология и геофизика. - 2017. - Т. 58. - № 3-4. - С. 533-543. - DOI: [10.15372/GiG20170316](https://doi.org/10.15372/GiG20170316)

Рыжкова С.В., Замирайлова А.Г., Костырева Е.А., Сотнич И.С., Фомин М.А., Эдер В.Г. Характеристика продуктивного интервала баженовской свиты в юго-восточных районах Западной Сибири (на примере Западно-Квензерской площади) // Нефтегазовая геология. Теория и практика. - 2022. - Т. 17. - № 4. - http://www.ngtp.ru/rub/2022/34_2022.html. DOI: [10.17353/2070-5379/34_2022](https://doi.org/10.17353/2070-5379/34_2022)

Сотнич И.С., Костырева Е.А. Ароматические соединения в битумоидах баженовской свиты севера Хантейской гемиантеклизы // Георесурсы. - 2021. - Т. 23. - № 1. - С. 42-51.

Сотнич И.С., Костырева Е.А., Родякин С.В., Рыжкова С.В., Конторович А.Э. Дифференциация битумоидов баженовской свиты Северо-Сургутского района в ходе генерации и миграции // Геология и геофизика. - 2023. - Т. 64. - № 12. - С. 1732-1741. DOI: [10.15372/GiG2023145](https://doi.org/10.15372/GiG2023145)

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

Чахмахчев А.В., Чахмахчев В.А. Ароматические сернистые соединения как показатели термической зрелости углеводородных систем // Геохимия. - 1995. - № 11. - С. 1656-1669.

Чахмахчев В.А. Углеводороды- геохимические показатели нефте- и газоносности недр // Геохимия. - 1989. - № 8. - С. 1108-1119.

Эдер В.Г., Рыжкова С.В., Дзюба О.С., Замирайлова А.Г. Литостратиграфия и обстановки седиментации баженовской свиты (Западная Сибирь) в центральном, юго-восточном и северных районах её распространения // Стратиграфия. Геологическая корреляция. - 2022. - Т. 30. - №5. - С. 46-74. DOI: [10.31857/S0869592X22050027](https://doi.org/10.31857/S0869592X22050027)

Alexander R., Strachan M.G., Kagi R.I., Van Bronswuk W. Heating rate effects on aromatic maturity indicators // Organic Geochemistry. - 1986. - Vol. 10. - P. 997-1003. DOI: [10.1016/S0146-6380\(86\)80038-9](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(86)80038-9)

Budzinski H., Garrigues Ph., Connan J., Devillers J., Domine D., Radke M., Oudin J.L. Alkylated phenanthrene distributions as maturity and origin indicators in crude oils and rock extracts // Geochimica et Cosmochimica Acta. - 1995. - Vol. 59 (10). - P. 2043-2056. DOI: [10.1016/0016-7037\(95\)00125-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00125-5)

Cassini F., Gallango O., Talukdar S., Vallejos C., Ehrmann U. Methylphenanthrene maturity index of marine source rock extracts and crude oils from the Maracaibo Basin // Organic Geochemistry. - 1988. - Vol. 1-3. - P. 73-89. DOI: [10.1016/0146-6380\(88\)90027-7](https://doi.org/10.1016/0146-6380(88)90027-7)

Radke M. Application of aromatic compounds as maturity indicators in source rocks and crude oils // Marine and Petroleum Geology. - 1988. - Vol. 5. - P. 224-236. DOI: [10.1016/0264-8172\(88\)90003-7](https://doi.org/10.1016/0264-8172(88)90003-7)

Radke M., Welte D.H., Willsch H. Maturity parameters based on aromatic hydrocarbons: Influence of the organic matter type // Organic Geochemistry. - 1986. - Vol. 10 (1-3). - P. 51-63. DOI: [10.1016/0146-6380\(86\)90008-2](https://doi.org/10.1016/0146-6380(86)90008-2)

Radke M., Willsch H., Leuthaeuser D., Teichmuller M. Aromatic components of coal: relation of distribution pattern to rank // Geochimica et Cosmochimica Acta. - 1982. - Vol. 46. - P. 1831-1848. DOI: [10.1016/0016-7037\(82\)90122-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(82)90122-3)

Szczerba M., Rospondek M.J. Controls on distributions of methylphenanthrenes in sedimentary rock extracts: Critical evaluation of existing geochemical data from molecular modelling // Organic Geochemistry. - 2010. - Vol. 41. - P. 1297-1311. DOI: [10.1016/j.orggeochem.2010.09.009](https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2010.09.009)

This is an open access article under the CC BY 4.0 license

Received 11.03.2024

Published 17.04.2024

Sotnich I.S., Kostyрева E.A.

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (IPGG SB RAS), Novosibirsk, Russia, SotnichIS@ipgg.sbras.ru, KostyреваEA@ipgg.sbras.ru

FEATURES OF PHENANTHRENES DISTRIBUTION IN AQUAGEN ORGANIC MATTER BAZHENOV FORMATION, WESTERN SIBERIA

The features of the phenanthrene distribution in the Bazhenov Formation in the southeast of Western Siberia are considered. It has been shown that with increasing maturity of organic matter, the total content of phenanthrene in bitumens increases, and the concentrations of mono-, di- and trimethyl-substituted homologues among them increase. It has been established that the modified phenanthrene parameter ($PP-1_{mod} = (1MF + 9MF) / (2MF + 3MF)$), phenanthrene index ($PI = 2MF/F$), ratios 1,1,7, can be used as the main indicators of the maturity of organic matter. 8-tetramethyl-1,2,3,4-tetrahydrophenanthrene/1,7,8-trimethylphenanthrene, $9MF/1MF$, $9MF/F$ and $1MF/F$, however, the influence of primary migration processes in transformed organic matter on them should be taken into account.

Keywords: organic matter, bitumen, phenanthrene, primary migration process, Bazhenov Formation, Western Siberia.

For citation: Sotnich I.S., Kostyрева E.A. Osobennosti raspredeleniya fenantrenov v akvagenom organicheskom veshchestve bazhenovskoy svity Zapadnoy Sibiri [Features of phenanthrenes distribution in aquagen organic matter Bazhenov Formation, Western Siberia]. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya i Praktika*, 2024, vol. 19, no. 2, available at: https://www.ngtp.ru/rub/2024/9_2024.html. EDN: NOAPCK

References

Alexander R., Strachan M.G., Kagi R. I., Van Bronswuk W. Heating rate effects on aromatic maturity indicators. *Organic Geochemistry*, 1986, vol. 10, pp. 997-1003. DOI: [10.1016/S0146-6380\(86\)80038-9](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(86)80038-9)

Budzinski H., Garrigues Ph., Connan J., Devillers J., Domine D., Radke M., Oudin J.L. Alkylated phenanthrene distributions as maturity and origin indicators in crude oils and rock extracts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, vol. 59 (10), pp. 2043-2056. DOI: [10.1016/0016-7037\(95\)00125-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00125-5)

Burdel'naya N.S., Bushnev D.A. *Novyy pokazatel' zrelosti v organicheskom veshchestve domanikovykh otlozheniy* [A new indicator of maturity in the organic matter of Domanik Formation]. *Geologiya i geofizika*, 2021, vol. 62, no. 2, pp. 187-196. (In Russ.).

Cassini F., Gallango O., Talukdar S., Vallejos C., Ehrmann U. Methylphenanthrene maturity index of marine source rock extracts and crude oils from the Maracaibo Basin. *Organic Geochemistry*, 1988, vol. 1-3, pp. 73-89. DOI: [10.1016/0146-6380\(88\)90027-7](https://doi.org/10.1016/0146-6380(88)90027-7)

Chakhmakhchev A.V., Chakhmakhchev V.A. Aromatic sulfur compounds as indicators of the thermal maturity of hydrocarbon systems]. *Geokhimiya*, 1995, no. 11, pp. 1656-1669. (In Russ.).

Chakhmakhchev V.A. Uglevodorody- geokhimicheskie pokazateli nefte- i gazonosnosti neдр [Hydrocarbons - geochemical indicators of oil and gas content of the subsoil]. *Geokhimiya*, 1989, no. 8, pp. 1108-1119. (In Russ.).

Dolzhenko K.V., Fomin A.N. Informativnost' fenantrenovykh pokazateley zrelosti organicheskogo veshchestva v pozdnem mezokatageneze i apokatageneze (na primere sverkhglubokoy skvazhiny Srednevilyuskaya-27, Vostochnaya Sibir') [Informativeness of

phenanthrene indicators of maturity of organic matter in late mesocatagenesis and apocatagenesis (using the example of the ultra-deep well Srednevilyuy-27, Eastern Siberia)]. *Geokhimiya*, 2022, vol. 67, no. 1, pp. 37-46. (In Russ.).

Eder V.G., Ryzhkova S.V., Dzyuba O.S., Zamiraylova A.G. Litostratigrafiya i obstanovki sedimentatsii bazhenovskoy svity (Zapadnaya Sibir') v tsentral'nom, yugo-vostochnom i severnykh rayonakh ee rasprostraneniya [Lithostratigraphy and sedimentation conditions of the Bazhenov Formation (Western Siberia) in the central, southeastern and northern regions of its distribution]. *Stratigrafiya. Geologicheskaya korrelyatsiya*, 2022, vol. 30, no. 5, pp. 46-74. (In Russ.). DOI: [10.31857/S0869592X22050027](https://doi.org/10.31857/S0869592X22050027)

Fomin A.N. *Katagenez organicheskogo veshchestva i neftegazonosnost' mezozoyskikh i paleozoyskikh otlozheniy Zapadno-Sibirskogo megabasseyna* [Catagenesis of organic matter and oil and gas potential of Mesozoic and Paleozoic strata of the West Siberian megabasin]. Novosibirsk: INGG SO RAN, 2011, 331 p. (In Russ.).

Goncharov I.V., Samoilenko V.V., Oblasov N.V., Fadeeva S.V. Catagenesis of organic matter of rocks of the Bazhenov Formation in the southeast of Western Siberia (Tomsk region) [Katagenez organicheskogo veshchestva porod bazhenovskoy svity yugo-vostoka Zapadnoy Sibiri (Tomskaya oblast')]. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2013, no. 10, pp. 32-37. (In Russ.).

Kashirtsev V.A., Parfenova T.M., Golovko A.K., Nikitenko B.L., Zueva I.N., Chalaya O.N. Biomarkery-fenantreny v organicheskom veshchestve dokembriyskikh i fanerozoyskikh otlozheniy i v neft'yakh Sibirskoy platformy [Biomarkers-phenanthrene in organic matter of Precambrian and Phanerozoic strata and in oils of the Siberian platform]. *Geologiya i geofizika*, 2018, vol. 59, no. 10, pp. 1720-1729. (In Russ.).

Kolesnikov A.Yu., Naydenov O.V., Matveeva I.A. Reliktovye politsiklicheskie aromatische uglevodorody kak pokazateli usloviy genezisa neftey [Relict polycyclic aromatic hydrocarbons as indicators of the genesis of oils conditions]. *Neftekhimiya*, 1991, vol. 31, no. 6, pp. 723-736. (In Russ.).

Kontorovich A.E., Kontorovich V.A., Ryzhkova S.V., Shurygin B.N., Vakulenko L.G., Gaydeburova E.A., Danilova V.P., Kazanenkov V.A., Kim N.S., Kostyрева E.A., Moskvин V.I., Yan P.A. Paleogeografiya Zapadno-Sibirskogo osadochnogo basseyna v yurskom periode [Paleogeography of the West Siberian sedimentary basin in the Jurassic period]. *Geologiya i geofizika*, 2013, vol. 54, no. 8, pp. 972-1012. (In Russ.).

Kontorovich A.E., Kostyрева E.A., Rodyakin S.V., Sotnich I.S., Yan P.A. *Geokhimiya bitumoidov bazhenovskoy svity* [Geochemistry of bitumens of the Bazhenov Formation]. *Geologiya i geofizika*, 2018, no. 2, pp. 79-88. (In Russ.).

Kontorovich A.E., Melenevskiy V.N., Ivanova E.N., Fomin A.N. Fenantreny, aromatische sterany i dibenzotiofeny v yurskikh otlozheniyakh Zapadno-Sibirskogo neftegazonosnogo basseyna i ikh znachenie dlya organicheskoy geokhimii [Phenanthrene, aromatic steranes and dibenzothiophenes in Jurassic strata of the West Siberian oil and gas basin and their significance for organic geochemistry]. *Geologiya i geofizika*, 2004, vol. 45, no. 7, pp. 873-883. (In Russ.).

Kostyрева E.A., Sotnich I.S. Geokhimiya organicheskogo veshchestva bazhenovskoy svity severa Khanteyskoy anteklizy [Geochemistry of organic matter of the Bazhenov Formation in the north of the Khantei anticline]. *Geologiya i geofizika*, 2017, vol. 58, no. 3-4, pp. 533-543. (In Russ.). DOI: [10.15372/GiG20170316](https://doi.org/10.15372/GiG20170316)

Radke M. Application of aromatic compounds as maturity indicators in source rocks and crude oils. *Marine and Petroleum Geology*, 1988, vol. 5, pp. 224-236. DOI: [10.1016/0264-8172\(88\)90003-7](https://doi.org/10.1016/0264-8172(88)90003-7)

Radke M., Welte D.H., Willsch H. Maturity parameters based on aromatic hydrocarbons: Influence of the organic matter type. *Organic Geochemistry*, 1986, vol. 10 (1-3), pp. 51-63. DOI: [10.1016/0146-6380\(86\)90008-2](https://doi.org/10.1016/0146-6380(86)90008-2)

Radke M., Willsch H., Leuthaeuser D., Teichmuller M. Aromatic components of coal: relation of distribution pattern to rank. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1982, vol. 46, pp. 1831-1848. DOI: [10.1016/0016-7037\(82\)90122-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(82)90122-3)

Ryzhkova S.V., Zamiraylova A.G., Kostyreva E.A., Sotnich I.S., Fomin M.A., Eder V.G. Kharakteristika produktivnogo intervala bazhenovskoy svity v yugo-vostochnykh rayonakh Zapadnoy Sibiri (na primere Zapadno-Kvenserskoy ploshchadi) [Characterization of Bazhenov Formation productive interval: a case study of West-Kvenzer area, southeastern Western Siberia]. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya I Praktika*, 2022, vol. 17, no. 4, available at: http://www.ngtp.ru/rub/2022/34_2022.html (In Russ.). DOI: [10.17353/2070-5379/34_2022](https://doi.org/10.17353/2070-5379/34_2022)

Sotnich I.S., Kostyreva E.A. Aromaticheskie soedineniya v bitumoidakh bazhenovskoy svity severa Khanteyskoy gemianteklizy [Aromatic compounds in bitumens of the Bazhenov Formation in the north of the Khantei hemianteclise]. *Georesursy*, 2021, vol. 23, no. 1, pp. 42-51. (In Russ.).

Sotnich I.S., Kostyreva E.A., Rodyakin S.V., Ryzhkova S.V., Kontorovich A.E. Differentsiatsiya bitumoidov bazhenovskoy svity Severo-Surgutskogo rayona v khode generatsii i migratsii [Differentiation of bitumens of the Bazhenov Formation of the North Surgut region during generation and migration]. *Geologiya i geofizika*, 2023, vol. 64, no. 12, pp. 1732-1741. (In Russ.). DOI: [10.15372/GiG2023145](https://doi.org/10.15372/GiG2023145)

Szczerba M., Rospondek M.J. Controls on distributions of methylphenanthrenes in sedimentary rock extracts: Critical evaluation of existing geochemical data from molecular modelling. *Organic Geochemistry*, 2010, vol. 41, pp. 1297-1311. DOI: [10.1016/j.orggeochem.2010.09.009](https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2010.09.009)

Zamiraylova A.G., Kostyreva E.A., Eder V.G., Ryzhkova S.V., Sotnich I.S. Litologo-geokhimicheskaya kharakteristika georgievskoy, bazhenovskoy i kulomzinskoy svit na Archinskoy ploshchadi (NyuroI'skaya vpadina, Tomskaya oblast') [Lithological and geochemical characteristics of the Georgiev, Bazhenov and Kulomzin Formations in the Archin area (NyuroI Depression, Tomsk region)]. *Geologiya nefti i gaza*, 2019, no. 3, pp. 99-113. (In Russ.). DOI: [10.31087/0016-7894-2019-3-99-113](https://doi.org/10.31087/0016-7894-2019-3-99-113)

Zhil'tsova A.A., Isaev V.I., Korzhov Yu.V. Vertikal'naya geokhimicheskaya zonal'nost' neftegazonosnykh kompleksov (na primere Rogozhnikovskogo i Severo-Rogozhnikovskogo mestorozhdeniy) [Vertical geochemical zoning of oil and gas complexes (on the example of the Rogozhnikov and Severo-Rogozhnikov fields)]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2013, vol. 322, no. 1, pp. 69-82. (In Russ.).