

УДК 550.47:552.578.2.061.32(571.5)

## ГЕОХИМИЯ БИОМАРКЕРОВ И АСФАЛЬТЕНОВ ДОКЕМБРИЙСКОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА АЛДАНО-МАЙСКОЙ ВПАДИНЫ СИБИРИ

© 2024 г. И. Д. Тимошина<sup>1</sup>, Л. С. Борисова<sup>1\*</sup>, В. Р. Лившиц<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,  
Россия, 630090, Новосибирск, просп. академика Коптюга, 3*

<sup>2</sup> *Новосибирский государственный университет, Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2  
E-mail: TimoshinaID@ipgg.sbras.ru; BorisovaLS@ipgg.sbras.ru; LivshicVR@ipgg.sbras.ru*

Поступила в редакцию 06.06.2023

После доработки 06.06.2023

Принята к публикации 27.02.2024

В работе проведено сравнение элементного состава асфальтенов с параметрами углеводородов-биомаркеров и нерастворимого органического вещества (ОВ) докембрия Алдано-Майской впадины. Выявлена зависимость элементного состава асфальтенов от пиролитических характеристик ОВ. Использование данных по составу асфальтенов наряду с биомаркерными параметрами позволяет более четко охарактеризовать генетические и катагенетические особенности таких сложных объектов как докембрийские битумоиды. Отмечается взаимосвязь элементного состава асфальтенов и параметров ароматической фракции, характеризующих степень зрелости ОВ. Параметры асфальтенов с данными по изучению биомаркеров насыщенной фракции практически не коррелируют.

**Ключевые слова:** юго-восток Сибирской платформы; органическое вещество; асфальтены; элементный состав; УВ-биомаркеры

DOI: 10.53392/27823857-2024-4-1-90; EDN: HBGTCW

Докембрийское органическое вещество (ОВ) Алдано-Майской впадины было изучено ранее в ряде работ [1–10]. Необходимо учитывать, что докембрийские битумоиды являются сложным объектом для изучения. Их состав часто искажен за счет высокой преобразованности, и при этом отсутствуют подходящие мацералы для оценки углепетрографическим методом. Также не всегда можно опираться на данные пиролиза из-за возможного присутствия твердых битумов, которые повышают  $C_{орг}$  и снижают битумоидный коэффициент. Следовательно, всегда остается сомнение в автохтонности битумоидов и соответственно в интерпретации данных по углеводородам (УВ)-биомаркерам. Привлекая результаты изучения асфальтенов можно проверить генетические и катагенетические построения по УВ-биомаркерам, учитывая, что асфальтены отстают от керогена по катагенезу [11, 12] и довольно долго сохраняют состав и структуру, а также менее миграционноспособны и представляют собой наиболее автохтонную часть битумоида. Миграцион-

ные процессы могут влиять на распределение УВ. В ряде работ рассмотрены возможное перераспределение концентраций УВ-биомаркеров при миграции в слабопроницаемой карбонатной толще [13], дополнительная обогащенность низкомолекулярными соединениями катагенетически преобразованного ОВ [14], повышение отношений  $20S/(20S + 20R)$  в стернах  $C_{29}$ , гопаны  $C_{27-35}$ /трицикланы  $C_{19-31}$ ,  $Ts/Tm$  в гопанах,  $2 \times C_{19-20}/C_{23-26}$  в трицикланах [15, 16], отмечались подобные миграционные эффекты и в докембрийских битумоидах Алдано-Майской впадины [10].

Все исследования по органической геохимии докембрия Алдано-Майской впадины касались характеристик нерастворимого ОВ и распределения углеводородов. В настоящую работу дополнительно включены результаты по составу асфальтенов скв. Усть-Майская-366 и 4 образца, отобранные из обнажений р. Мая в пределах Алдано-Майской впадины, которые частично рассматривались в работе [17].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Органическое вещество пород Алдано-Майской впадины (14 образцов — 10 из скв. Усть-Майская-366 и 4 из обнажений р. Мая) было изучено по схеме, принятой в ИНГГ СО РАН. По стандартной методике [18] в образцах пород определен органический углерод ( $C_{\text{орг}}$ ) и его пиролитические и изотопные характеристики, хлороформом экстрагирован битумоид, из которого с помощью петролейного эфира (с температурой кипения 40–70°) в 1:40 пропорции высажены асфальтены. После выделения асфальтенов битумоид подвергся хроматографированию для выделения метанонафтеновых, нафтеноароматических углеводородов с дальнейшим изучением их методом хроматомасс-спектрометрии. Элементный состав (С, Н, S, N) асфальтенов определен на элементном анализаторе EA 1110.

Исследование включало сравнительный анализ пиролитических и изотопных характеристик органического углерода ( $C_{\text{орг}}$ ), концентраций растворимых в хлороформе битумоидов и их группового состава, элементного состава асфальтенов, а также распределения углеводородов-биомаркеров.

В силу небольшого количества образцов, нет оснований для принятия гипотезы о нормальном распределении параметров различных фракций, так что в качестве меры их взаимосвязи были использованы свободные от распределения коэффициенты корреляции Спирмена и Кендалла [19].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Геохимические характеристики изученных образцов докембрия Алдано-Майской впадины Сибирской платформы приведены в табл. 1–4. Из табл. 1 видно, что половина образцов — аргиллиты, 5 — известняки и доломиты, 1 глинистый доломит и 1 песчаник. Образцы в основном низкоуглеродистые, к нефтематеринским толщам могут быть отнесены только аргиллиты № 10 (нерюенская свита) и № 14 (ципандинская свита). Судя по данным пиролиза, ОВ образцов из обнажений р. Мая слабо преобразовано ( $T_{\text{max}}$  в пределах 430–443°С) и сохранило высокий генерационный потенциал (водородный индекс НІ составляет 205–434 мгУВ/г $C_{\text{орг}}$ ). В образцах скв. Усть-Майская-366 НІ в основном

**Таблица 1.** Концентрации  $C_{\text{орг}}$ , его пиролитические характеристики и изотопный состав в докембрийских отложениях Алдано-Майской впадины

№	Скважина	Глубина, м	Возраст	Свита	Порода	Н.о.	$C_{\text{орг}}$	НІ	$T_{\text{max}}$	$\delta^{13}C_{\text{орг}}$
1	Скв. Усть-Майская-366	1713.88	V	сарданинская	глинистый доломит	17.0	0.2	71	435	–28.0
2		1748.32	V	сарданинская	аргиллит	93.5	0.4	80	436	–26.4
3		1929.4	R <sub>3</sub>	усть-кирбинская	алевропелит	91.0	0.2	76	439	—
4		3002.33	R <sub>3</sub>	кандыкская	аргиллит	89.5	0.2	49	448	—
5		3015.5	R <sub>3</sub>	кандыкская	алевроаргиллит	74.0	0.9	187	447	–32.0
6		3024.94	R <sub>3</sub>	кандыкская	алевроаргиллит	78.0	0.3	31	452	–28.3
7		3133	R <sub>3</sub>	игниканская	песчаник	64.5	0.6	22	449	–26.1
8		3214.3	R <sub>3</sub>	игниканская	известняк	2.3	0.2	66	457	–26.9
9		3215.18	R <sub>3</sub>	игниканская	известняк	2.0	0.2	76	461	–26.3
10		3474.49	R <sub>3</sub>	нерюенская	черный аргиллит	93.0	1.2	25	452	–28.2
11	Обнажения р. Мая		R <sub>3</sub>	мильконская	доломиты, известняки	1.2	0.2	205	430	—
12			R <sub>2</sub>	ципандинская	черный известняк	5.6	0.7	395	442	—
13			R <sub>2</sub>	ципандинская	черный известняк	7.0	0.8	267	443	—
14				ципандинская	темно-коричневый известковистый аргиллит	53.5	3.3	434	430	—

Н.о. — нерастворимый в соляной кислоте остаток породы, в % на породу;  $C_{\text{орг}}$  — концентрация органического углерода, в % на породу; НІ — водородный индекс, равный  $S2/C_{\text{орг}} \cdot 100$  (в мгУВ/г $C_{\text{орг}}$ ), где S2 — пик выхода углеводородных продуктов разложения керогена в процессе пиролиза;  $T_{\text{max}}$  — температура максимального выхода углеводородных продуктов разложения керогена в процессе пиролиза, в °С;  $\delta^{13}C_{\text{орг}}$  — изотопный состав органического углерода, в ‰.

**Таблица 2.** Концентрация битумоидов ( $b_{хл}$ ), битумоидный коэффициент ( $\beta$ ), групповой состав битумоидов и элементный состав асфальтенов (нумерация образцов соответствует табл. 1)

№	$b_{хл}$ , % на поруду	$\beta$ , %	Групповой состав битумоидов, % на битумоид				Элементный состав асфальтенов, %					$(H/C)_{ат}$	$(O/C)_{ат}$
			насыщенные УВ	ароматиче- ские УВ	смолы	асфаль- тены	С	Н	N	S	О		
1	0.007	3.0	27.5	11.9	49.4	11.2	75.1	6.0	0.7	1.8	16.5	0.95	0.16
2	0.005	1.0	35.0	11.5	49.9	3.5	68.4	6.9	0.8	1.0	23.0	1.20	0.25
3	0.007	2.1	16.9	11.4	61.9	9.7	75.3	6.5	1.1	1.9	15.2	1.04	0.15
4	0.007	2.7	21.2	6.6	55.2	17.0	74.1	6.3	0.8	1.1	17.7	1.03	0.18
5	0.211	17.9	67.8	11.4	18.3	2.5	82.3	6.3	0.4	1.1	9.9	0.91	0.09
6	0.008	1.7	29.3	9.4	51.6	9.8	78.6	6.3	0.9	1.5	12.7	0.97	0.12
7	0.009	1.2	9.9	13.4	40.1	36.6	81.4	5.4	1.6	1.9	9.8	0.79	0.09
8	0.007	3.2	32.8	8.5	41.0	17.7	75.6	5.7	0.9	1.8	15.9	0.91	0.16
9	0.015	5.4	50.5	9.5	31.7	8.3	73.8	5.6	0.8	2.8	17.1	0.91	0.17
10	0.007	0.5	32.4	10.8	51.8	5.1	72.8	5.6	0.8	3.3	17.5	0.92	0.18
11	0.036	17.1	38.0	3.1	48.3	10.6	81.4	6.5	1.0	1.4	9.7	0.96	0.09
12	0.033	5.1	9.2	16.1	42.7	32.1	83.1	6.4	1.3	1.3	8.0	0.92	0.07
13	0.029	3.8	12.2	14.2	46.6	27.1	81.6	6.5	1.3	1.5	9.2	0.95	0.08
14	0.094	2.8	10.4	17.5	60.9	11.3	79.7	6.7	1.2	1.4	11.0	1.01	0.10

<100 мгУВ/гС<sub>орг</sub>. Лишь в образце № 5 кандыкской свиты отмечен более высокий HI (187 мгУВ/гС<sub>орг</sub>), в этом же образце ОВ обогащено изотопом <sup>12</sup>C ( $\delta^{13}C_{орг} = -32.0\%$ , в то время как в остальных образцах варьирует от (-28.3) до (-26.1)‰). Катагенетическая преобразованность ОВ скв. Усть-Майская-366 более высокая, чем в образцах р. Мая ( $T_{max}$  в пределах 435–461°C) и в целом растет вниз по разрезу. Кроме того, следует учитывать, что присутствие битумов может завязать HI и снизить  $T_{max}$  и  $\delta^{13}C_{орг}$ . В работе [8] на основании пиролитических данных и состава пластовых газов предполагается, что ОВ рифея скв. Усть-Майская-366 претерпело кроме главной фазы нефтеобразования и более жесткие термодинамические условия.

Изученные образцы содержат низкие концентрации битумоидов (табл. 2) — сотые и тысячные доли % на породу, кроме образца № 5 ( $b_{хл} = 0.2113\%$  на породу). Битумоид № 5 согласно битумоидному коэффициенту и групповому составу ( $\beta = 17.9\%$ , сумма УВ = 79.2% на битумоид) является аллохтонным, и этот образец отличается низким значением  $\delta^{13}C_{орг}$  и высоким HI.

В образцах скв. Усть-Майская-366 отмечается еще один образец — № 9, имеющий согласно  $\beta$  (5.4%) и групповому составу (сумма УВ = 60.0% на битумоид) примесь аллохтонного битумоида, и 2 образца из обнажений р. Мая имеют  $\beta > 5\%$ , которое не сопровождается повышением суммы

углеводородов выше 50% (табл. 2). Концентрации асфальтенов в образцах варьируют широко — от 2.5 до 36.6% на битумоид, самая низкая концентрация в аллохтонном битумоиде № 5, самая высокая (>30%) в битумоиде № 7 из песчаника игниканской свиты и № 12 из известняка ципандинской свиты. В этих битумоидах также ароматических УВ больше, чем насыщенных. Превышение концентраций ароматических УВ над насыщенными отмечается во всех 3 образцах ципандинской свиты р. Мая, и лишь в аллохтонном битумоиде (№ 11) мильконской свиты насыщенных УВ значительно больше, чем ароматических (табл. 2).

В асфальтенах определен элементный состав (табл. 2). Все асфальтены имеют близкие содержания водорода — 5.4–6.9% (табл. 2) и широко варьирующие содержания углерода (68.4–83.1%) и гетероэлементов (10.5–24.8%). Наименьшая концентрация углерода и наибольшая водорода и гетероэлементов (кислорода) отмечается в сарданинском битумоиде № 2. Асфальтены аллохтонного кандыкского битумоида № 5 содержат углерода значительно больше (82.3%), чем другие кандыкские асфальтены (74.1 и 78.6%), хотя все они локализованы в пределах 22 м и аллохтонный располагается примерно посередине. Обогащены углеродом (81.4%) асфальтены битумоида из песчаника № 7, локализованного в верхней части игниканской свиты (и в его асфальтенах наименьшая концентрация водорода — 5.4%),

по сравнению с другими образцами игниканской свиты (73.8 и 75.6%), локализованными на 80 м ниже по разрезу. Вероятно, эти два битумоида, один из которых (№ 5) аллохтонный (по  $\beta$  и групповому составу), а другой (№ 7) скорее всего «остаточный» (по групповому составу) обогащены углеродом за счет разных миграционных эффектов — аллохтонный битумоид № 5 является продуктом миграции из более глубоководных районов, а в образце № 7 произошло накопление за счет эмиграции более легких компонентов. Причем битумоид № 7 локализован в песчанике, и поэтому не исключено, что он претерпел две фазы миграции: сначала свойственное аллохтонным накопление подвижных компонентов, а затем их более позднее интенсивное рассеивание.

На диаграмме ван-Кревелена (рис. 1) асфальтены р. Мая расположены вдоль нижней границы керогена II и асфальтенов II' и верхней границы асфальтенов III' [17, 20]. Асфальтены скв. Усть-Майская-366 занимают область значений между типами керогена II и III, причем образцы нерюенской и игниканской свит тяготеют к верхней границе керогена III, находясь в области асфальтенов III'. Возможно ОВ

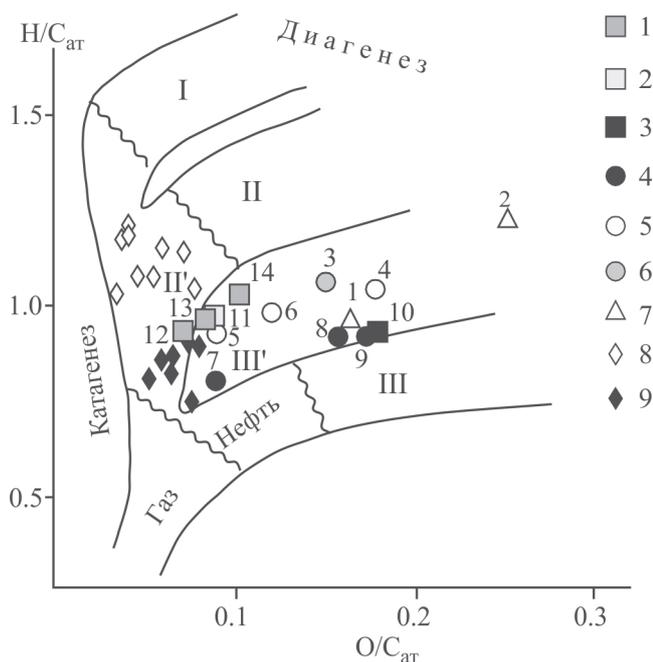
этих отложений имеет более высокую стадию преобразования (о чем свидетельствует более низкие значения  $(H/C)_{ат}$  в асфальтенах) по сравнению с образцами усть-кирбинской и кандыкской свит. Образцы нерюенской и игниканской свит образуют последовательность обратную по разрезу: верхний игниканский образец № 7 показывает наибольшую преобразованность, нижний нерюенский № 10 — наименьшую. Кроме того, 6 изученных образцов находятся в области начально зрелого керогена (попадают на диаграмме ван-Кревелена в область высоких значений  $(O/C)_{ат}$  — это сарданинский образец из карбонатов (№ 1), усть-кирбинский (№ 3), верхний из кандыкских образцов (№ 4), 2 образца, близко друг к другу расположенные (по разрезу скв. УМ-366 и на диаграмме ван-Кревелена): игниканские (№ 8 и 9) и нерюенский (№ 10). Один из сарданинских образцов — № 2 из аржиллитов попадает даже в зону незрелого ОВ.

По характеристикам насыщенных биомаркеров все битумоиды аквагенные ( $nC_{27}/nC_{17} < 1$ , Pr/Ph в среднем 1.2, в стеранах  $C_{29}/C_{27}$  в среднем 1.4, в гопанах Ts/Tm в среднем 1.0, в трицикланах  $2 \times C_{19-20}/C_{23-26}$  в среднем 1.0) [21–24] (табл. 3).

**Таблица 3.** Характеристики насыщенных УВ-биомаркеров, использованных для корреляций с параметрами асфальтенов (нумерация образцов соответствует табл. 1)

№	Ациклические УВ		Циклические УВ			
	Pr/Ph	$nC_{27}/nC_{17}$	$C_{29}/C_{27}$	K2	Ts/Tm	$I_{TC}$
1	1.1	0.9	1.4	4.0	2.3	0.6
2	1.4	0.2	1.0	3.0	0.6	1.8
3	1.3	0.3	1.0	3.2	0.7	0.8
4	1.2	0.2	1.3	3.7	0.8	0.6
5	1.0	0.1		нет стеранов и терпанов		
6	1.2	0.5	1.0	2.1	0.8	0.9
7	0.7	0.3	2.5	1.7	0.4	0.6
8	1.2	0.3	1.1	3.7	0.9	0.7
9	1.0	0.4	1.1	4.2	0.5	1.1
10	1.4	0.2	0.8	2.6	1.0	0.8
11	1.3	0.1	1.8	2.5	4.2	0.2
12	1.4	0.1	1.7	0.7	0.3	1.7
13	1.0	0.2	1.5	1.2	0.7	1.8
14	1.8	0.1	2.5	1.9	0.2	2.0

Pr/Ph — отношение ациклического изопреноида состава  $C_{19}$  к ациклическому изопреноиду состава  $C_{20}$ ;  $nC_{27}/nC_{17}$  — отношение нормального алкана состава  $C_{27}$  к нормальному алкану состава  $C_{17}$ ;  $C_{29}/C_{27}$  — отношение суммы стеранов состава  $C_{29}$  к сумме стеранов состава  $C_{27}$ ;  $K2 = \beta\beta(20S + 20R)/\alpha\alpha 20R$  — стерановый коэффициент зрелости в стеранах состава  $C_{29}$ , отношение суммы  $\beta\beta$ -стеранов конфигураций 20S и 20R к  $\alpha\alpha$ -стеранам состава  $C_{29}$  конфигурации 20R; Ts/Tm — отношение триснорнеогопана к трисноргопану;  $I_{TC} = 2 \times C_{19-20}/C_{23-26}$  — трициклановый индекс, отношение удвоенной суммы трицикланов состава  $C_{19-20}$  к сумме трицикланов состава  $C_{23-26}$ .



**Рис. 1.** Диаграмма Ван-Кревелена по асфальтенам (I, II, III — типы керогенов: озерный, морской и континентальный соответственно; II', III' — типы асфальтенов по Л.С. Борисовой (2004): морской и континентальный) в образцах докембрия Алдано-Майской впадины, свиты в обнажениях р. Мая: 1 — ципандинская, 2 — мильконская; свиты скв. Усть-Майская-366: 3 — нерюенская, 4 — игниканская, 5 — кандыкская, 6 — усть-кирбинская, 7 — сарданинская; для сравнения юрское ОВ Западной Сибири: 8 — аквагенное, 9 — террагенное (номера проб соответствуют таблицам).

Во всех образцах зафиксированы свойственные докембрийскому ОВ [22] 12- и 13-монометилалканы в разных количествах (2.1–12.9%, в среднем 6.3%). Накопление ОВ происходило в глинистом осадке (в стеранах в основном  $\beta\alpha/(\alpha\alpha + \beta\beta) \geq 0.3$ ) [23], диагенетические процессы проходили в морском осадке без сероводородного заражения (в гомогонанах  $C_{35}/C_{34} < 1$ ) [22, 25]. Судя по низким отношениям Ф/ДБТ (образцы № 1–3, 8, 9, 11) в ароматической фракции (табл. 4), сероводородное заражение могло периодически возникать, однако возможно эти повышения концентраций дибензотиофенов связаны с миграционными эффектами.

Как указывалось выше, для выявления взаимосвязи между параметрами разных фракций были использованы непараметрические коэффициенты корреляции. В табл. 5 представлены результаты расчета коэффициентов корреляции Спирмена (R).

Согласно этим коэффициентам отмечаются ожидаемые отрицательные связи между пиролитическими параметрами  $T_{\max}$  и НІ ( $R = -0.66$ ), между  $T_{\max}$  в ОВ и  $(H/C)_{\text{ат}}$  в асфальтенах ( $R = -0.62$ ), между НІ

и  $nC_{27}/nC_{17}$  ( $R = -0.64$ ), между НІ и ароматическими параметрами ФІ ( $R = -0.68$ ), MDR ( $R = -0.59$ ), MPI-1 ( $R = -0.73$ ), а также положительная связь между  $T_{\max}$  и ФІ ( $R = 0.67$ ), MDR ( $R = 0.81$ ), MPI-1 ( $R = 0.69$ ). Не обнаружена корреляция между пиролитическими параметрами и параметрами циклических насыщенных биомаркеров, а также с Pr/Ph. Показательно, что катагенетические коэффициенты ФІ, MDR, MPI-1 хорошо коррелируют между собой ( $R = 0.64–0.93$ ). Отмечается парадоксальная положительная корреляция ( $R = 0.74$ ) катагенетического стеранового коэффициента зрелости K2 [23] и отношения  $(O/C)_{\text{ат}}$  в асфальтенах, вероятно стерановый коэффициент зрелости здесь не работает, поскольку на него больше влияет не катагенез, а какие-то другие факторы, возможно миграционные или генетические. Отрицательная корреляция между  $(O/C)_{\text{ат}}$  в асфальтенах и  $C_{29}/C_{27}$  в стеранах ( $R = -0.72$ ) не ясна, она могла бы указывать на генетические вариации в источниках ОВ, если бы в коллекции в

**Таблица 4.** Характеристики ароматических и серосодержащих соединений (нумерация образцов соответствует табл. 1)

№	Ф/ДБТ	ФИ	ТАСИ	MDR	MPI-1
1	8.9	0.5	0.6	5.4	0.6
2	8.9	0.2	0.8	3.1	0.2
3	8.4	0.5	1.0	9.3	0.6
4	16.1	1.3	0.5	7.9	0.9
5	13.9	1.1	1.0	16.8	1.0
6	17.0	0.9	0.5	6.2	0.7
7	20.6	1.1	0.5	15.7	1.1
8	3.7	0.8	0.8	35.5	0.9
9	5.2	0.9	1.0	20.3	0.8
10	41.9	0.9	0.6	8.3	1.1
11	2.5	0.6	0.3	2.1	0.7
12	18.6	0.4	—	3.1	0.5
13	14.9	0.5	0.6	4.2	0.4
14	27.1	0.3	—	1.2	0.4

Ф/ДБТ — отношение суммы фенантронов к сумме дибензотиофенов; ФИ =  $2MP/P$  — отношение 2-метилфенантрена к фенантрону; ТАСИ =  $(TASC20 + TASC21)/TAC$  — отношение суммы триароматических стероидов состава  $C_{20}$  и  $C_{21}$  к сумме триароматических стероидов; MDR =  $4MDBT/1MDBT$  — метилдибензотиофеновый индекс, отношение 4-метилдибензотиофена к 1-метилдибензотиофену; MPI-1 =  $1.5 \times (2MP + 3MP)/(P + 1MP + 9MP)$  — метилфенантроновый индекс, отношение суммы 2- и 3-метилфенантронов к сумме фенантрена и 1- и 9-метилфенантронов.

**Таблица 5.** Коэффициенты корреляции между параметрами по Спирмену [19] (параметры расшифрованы в табл. 1–4)

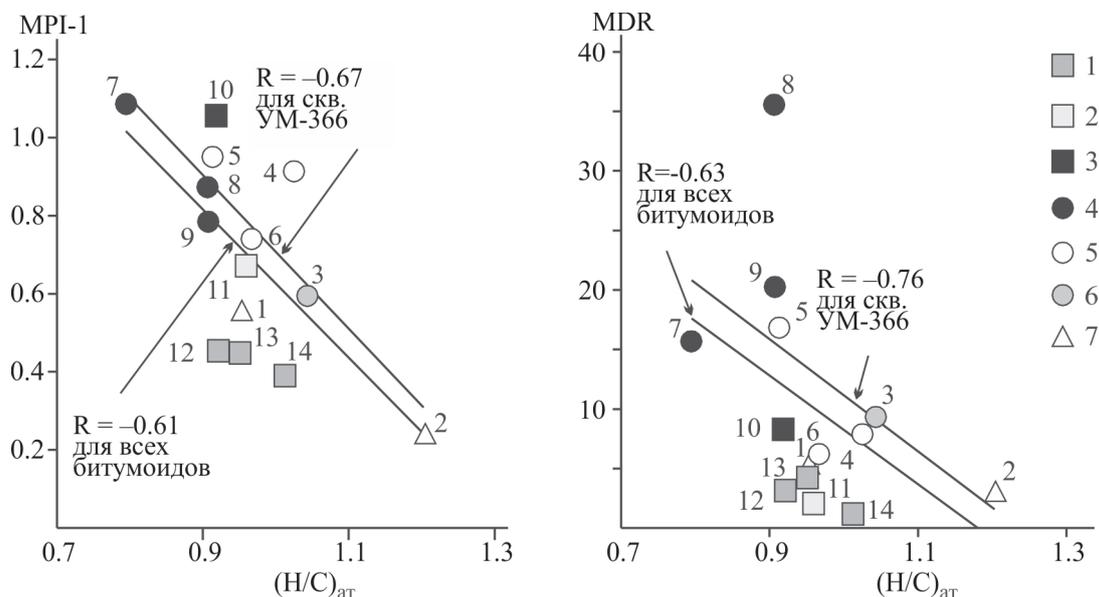
Параметры	HI	$T_{max}$	$(H/C)_{ar}$	$(O/C)_{ar}$	Pr/Ph	$nC_{27}/nC_{17}$	$C_{29}/C_{27}$	K2	$I_{TC}$	ФИ	MDR	MPI-1
HI	1.00	-0.66	0.29	-0.49	0.37	-0.64	0.40	-0.31	0.53	-0.68	-0.59	-0.73
$T_{max}$	-0.66	1.00	-0.62	0.27	-0.44	0.42	-0.43	0.26	-0.04	0.67	0.81	0.69
$(H/C)_{ar}$	0.29	-0.62	1.00	0.26	0.51	-0.12	-0.22	0.06	0.24	-0.46	-0.63	-0.61
$(O/C)_{ar}$	-0.49	0.27	0.26	1.00	0.15	0.42	-0.72	0.74	-0.02	0.08	0.24	0.13
Pr/Ph	0.37	-0.44	0.51	0.15	1.00	-0.52	-0.08	-0.19	0.35	-0.50	-0.56	-0.40
$nC_{27}/nC_{17}$	-0.64	0.42	-0.12	0.42	-0.52	1.00	-0.46	0.52	-0.26	0.12	0.49	0.17
$C_{29}/C_{27}$	0.40	-0.43	-0.22	-0.72	-0.08	-0.46	1.00	-0.47	-0.10	-0.12	-0.39	-0.14
K2	-0.31	0.26	0.06	0.74	-0.19	0.52	-0.47	1.00	-0.35	0.15	0.49	0.25
$I_{TC}$	0.53	-0.04	0.24	-0.02	0.35	-0.26	-0.10	-0.35	1.00	-0.51	-0.34	-0.61
ФИ	-0.68	0.67	-0.46	0.08	-0.50	0.12	-0.12	0.15	-0.51	1.00	0.64	0.93
MDR	-0.59	0.81	-0.63	0.24	-0.56	0.49	-0.39	0.49	-0.34	0.64	1.00	0.74
MPI-1	-0.73	0.69	-0.61	0.13	-0.40	0.17	-0.14	0.25	-0.61	0.93	0.74	1.00

принципомогли быть битумоиды, продуцированные керогеном типа III. Отрицательная связь между MPI-1 и трицикловым индексом  $I_{TC}$  ( $R = -0.61$ ) также не понятна, поскольку при катагенезе (повышение MPI-1) должно происходить разрушение высокомолекулярных соединений и накопление низкомолекулярных, а не наоборот, следовательно,  $I_{TC}$  должен повышаться.

Параметр  $(O/C)_{ar}$  в асфальтенах не обнаруживает связи практически ни с какими катагенетическими параметрами. Связь катагенетических параметров

ароматической фракции (табл. 4) с  $(H/C)_{ar}$  в асфальтенах (табл. 2) отчетливо обратно пропорциональная (табл. 5) для MPI-1 [26] и MDR [28] во всей коллекции ( $R$  составляет  $-0.61$  и  $-0.63$  соответственно) и усиливается отдельно для битумоидов скв. УМ-366 ( $R$  составляет  $-0.67$  и  $-0.76$  соответственно) (рис. 2).

Так, кандыкский аллохтонный битумоид № 5 имеет высокое значение MPI-1 = 1.0 (между МК<sub>1</sub><sup>2</sup>-МК<sub>2</sub> и МК<sub>2</sub>-МК<sub>3</sub><sup>2</sup>) и для него фиксируются повышения ТАСИ [27] и MDR [28] (табл. 4) и снижения в



**Рис. 2.** Взаимосвязь отношения  $(H/C)_{ar}$  в асфальтенах с некоторыми параметрами ароматических и серосодержащих соединений ( $MPI-1 = 1.5 \times (2MP + 3MP) / (P + 1MP + 9M)$ ,  $MDR = 4MDBT / 1MDBT$ ) (условные обозначения на рис. 1).

асфальтенах  $(H/C)_{ат}$  и  $(O/C)_{ат}$  (табл. 2) по сравнению с другими образцами свиты. Вероятно, он мигрировал из более погруженных отложений. Аналогичная зависимость отмечена и для игниканского битумоида из песчаника. Битумоид сарданинского аргиллита № 2 наоборот имеет очень высокие  $(H/C)_{ат}$  и  $(O/C)_{ат}$  в асфальтенах и очень низкие MPI-1 и MDR и, вероятно, эти характеристики отражают реальный катагенез ОВ сарданинской свиты, судя по MPI-1 — это градации  $\leq MK_1^1$ .

Аналогичные заключения могут быть сделаны на основе анализа коэффициентов корреляции Кендалла.

## ВЫВОДЫ

Нефтематеринские толщи могут быть локализованы в нерюенской и ципандинской свитах, содержащих обогащенные  $S_{орг}$  аргиллиты. Изученные докембрийские отложения в целом содержат аквагенное ОВ (распределение насыщенных ациклических и циклических УВ-биомаркеров), докембрийское (наличие 12- и 13-монометилалканов), накопившееся в глинистом осадке (высокие концентрации диастеранов), пережившее диагенез в морском осадке без сероводородного заражения (распределение гомогпанов). Возможно, сероводородное заражение при диагенезе время от времени возникало, судя по повышению концентраций дибензотиофенов в некоторых образцах, однако возможно эти повышения концентраций связаны с миграционными эффектами, поскольку не соответствуют распределению гомогпанов. Однако по параметрам асфальтенов на диаграмме ван Кревелена образцы скв. УМ-366 занимают нетипичное для асфальтенов аквагенного ОВ промежуточное положение между керогенами типа II и III.

Судя по соотношению пиролитических, асфальтеновых и биомаркерных параметров для оценки катагенеза ОВ докембрия Алдано-Майской впадины следует опираться на показатели ароматической фракции битумоида, характеристики насыщенной фракции сформированы иными факторами: параметры биомаркеров насыщенной фракции с параметрами ароматической фракции и с данными пиролиза и элементного состава асфальтенов практически не коррелируют. Однако эти зависимости желательно проверить на более представительной выборке.

Катагенетическая преобразованность нерюенского образца скв. УМ-366 согласно ароматическим параметрам ( $MDR = 8.3$ ,  $MPI-1 = 1.1$ ) соответствует грациям  $MK_2$ - $MK_3^2$ , и не исключено, что преобразованность еще выше (в области инверсии стерановых коэффициентов зрелости). Параметр  $(H/C)_{ат}$

в асфальтенах также показывает относительно высокую зрелость ОВ этой свиты.

Катагенетическая преобразованность битумоидов расположенных выше по разрезу рифейских отложений скв. УМ-366 скорее всего не превышает преобразованность автохтонного ОВ нерюенской свиты. Вариации в биомаркерных характеристиках скв. УМ-366, в том числе в катагенетических, могут быть связаны не только с разным уровнем катагенеза, а еще и с накоплением или рассеиванием миграционноспособных компонентов. Не исключено, что все они, даже автохтонные (по битумоидному коэффициенту  $\beta < 5\%$ ) содержат примеси. Однако, ряд характеристик (в целом увеличение  $T_{max}$  для  $S_{орг}$ , уменьшение  $(H/C)_{ат}$  и  $(O/C)_{ат}$  в асфальтенах, увеличение MPI-1 и MDR в ароматической фракции битумоида) указывает на увеличение катагенетической преобразованности вниз по разрезу скважины.

Катагенетическая преобразованность ОВ сарданинской свиты ниже, чем рифейских. Вероятно, эта свита может содержать слабозрелое ОВ, что отражается как в элементном составе асфальтенов, так и в катагенетических параметрах ароматической фракции образца № 2 этой свиты.

Катагенетическая преобразованность ОВ ципандинской и мильконской свит в обнажениях р. Мая ниже, чем в рифее скв. УМ-366, судя по меньшим значениям  $T_{max}$  для органического углерода, более высоким значениям  $(H/C)_{ат}$  и  $(O/C)_{ат}$  в асфальтенах, более низким значениям метилфенантронового и метилдобензотиофенового индексов в ароматической фракции. Кроме того, судя по высоким водородным индексам для органического углерода, ОВ ципандинской и мильконской свит не исчерпало свой генерационный потенциал, как ОВ скв. УМ-366.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке проектов ФНИ № FWZZ-2022-0011 и FWZZ-2022-0007.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Ирина Дмитриевна Тимошина*, канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0338-3866>

*Любовь Сергеевна Борисова*, докт. геол.-мин. наук, доцент, ведущий научный сотрудник  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4155-1832>

*Лившиц Валерий Рафаилович*, докт. геол.-мин. наук, доцент, главный научный сотрудник

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баженова Т. К., Белецкая С. Н., Беляева Л. С., Бикенина Д. А., Гурко Н. Н., Ивановская А. В., Ипатов Ю. И., Кичуева У. О., Макаров К. К., Неручев С. Г., Парпарова Г. М., Рогозина Е. А., Рудаевская В. А., Соловьева И. Л., Файзулина Е. М., Шапиро А. И., Шиманский В. К., Шуменкова Ю. М., Арефьев О. А., Гуляева Н. Д., Кулибакина И. Б., Работнов В. Т., Прохоров В. С., Шадский И. П.* Органическая геохимия палеозоя и допалеозоя Сибирской платформы и прогноз нефтегазоносности. Ленинград: Недра, 1981. 211 с.
2. *Баженова Т. К., Дахнова М. В., Можегова С. В.* Верхний протерозой Сибирской платформы — основной источник нефтегазоносности ее домезозойского мегабассейна // *Нефтегазовая геология*. 2011. Т. 6. № 2. С. 1–21. [http://www.ngtp.ru/rub/1/17\\_2011.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/1/17_2011.pdf)
3. *Баженова Т. К., Дахнова М. В., Жеглова Т. П., Лебедев В. С., Можегова С. В., Ларкин В. Н., Назарова Е. С., Нечитайло Г. С., Грайзер Э. М., Киселев С. М., Киселева Ю. А., Горюнова Е. А., Борисова Л. Б.* Нефтематеринские формации, нефти и газы докембрия и нижнего-среднего кембрия Сибирской платформы. Москва: ВНИГНИ, 2014. 128 с.
4. *Матвиенко Н. И., Соболев П. Н.* Микроэлементы и органическое вещество в планктоногенных отложениях малгинской свиты юго-востока Сибирской платформы // *Сб. науч. тр.: Ассоциация микроэлементов с органическим веществом в осадочных толщах Сибири*. Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 1984. С. 69–77.
5. *Соболев П. Н.* Геохимия доманикитной малгинской свиты Юдомо-Майской впадины / *Геология угленосных и горючесланцевых формаций Сибири*. Новосибирск: СНИИГГиМС, 1987. С. 69–76.
6. *Дахнова М. В., Жеглова Т. П., Можегова С. В.* Генерационные характеристики ОВ и распределение биомаркеров в битумоидах нефтематеринских пород рифея, венда и кембрия Сибирской платформы // *Геология и геофизика*. 2014. Т. 55. № 5–6. С. 953–961. <http://dx.doi.org/10.15372/GiG20140517> [*Dakhnova M. V., Zheglova T. P., Mozhegova S. V.* Generation characteristics of organic matter and distribution of biomarkers in bitumens of the Riphean, Vendian, and Cambrian source rocks of the Siberian platform // *Russian Geology and Geophysics*, 2014. V. 55. N 5–6. P. 755–762. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.05.018>].
7. *Сафронов А. Ф., Чалая О. Н., Зуева И. Н., Глязнецова Ю. С., Лифшиц С. Х., Александров А. Р.* Геохимия органического вещества рифейских отложений востока Алданской антеклизы // *Наука и образование*. 2015. № 4. С. 13–18.
8. *Соболев П. Н., Шиганова О. В., Дыхан С. В., Ахмедова А. Р.* Новые данные о перспективах нефтегазоносности Алдано-Майской впадины // *Геология и геофизика*. 2017. Т. 58. № 3–4. С. 643–656. <https://doi.org/10.15372/GiG20170325> [*Sobolev P. N., Shiganova O. V., Dykhan S. V., Akhmedova A. R.* New data on the petroleum potential of the Aldan-Maya depression // *Russian Geology and Geophysics*. 2017. V. 58. N 3–4. P. 529–540. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.03.002>].
9. *Суслова Е. А., Парфенова Т. М., Сараев С. В., Наговицин К. Е.* Органическая геохимия пород малгинской свиты мезопротерозоя и обстановки их формирования (юго-восток Сибирской платформы) // *Геология и геофизика*, 2017. Т. 58. № 3–4. С. 628–642. <https://doi.org/10.15372/GiG20170324> [*Suslova E. A., Parfenova T. M., Saraev S. V., Nagovitsyn K. E.* Organic geochemistry of rocks of the Mesoproterozoic Malgin formation and their depositional environments (southeastern Siberian platform) // *Russian Geology and Geophysics*. 2017. V. 58. N 3–4. P. 516–528. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.09.027>].
10. *Тимошина И. Д., Болдушевская Л. Н.* Геохимия органического вещества неопротерозоя на юго-востоке Сибирской платформы // *Георесурсы*. 2020. Т. 22. № 4. С. 41–54. <https://doi.org/10.18599/grs.2020.4.41-54> [*Timoshina I. D., Boldushevskaya L. N.* Geochemistry of Neoproterozoic organic matter in the southeast of the Siberian Platform // *Georesursy*. 2020. V. 22. № 4. P. 41–54. <https://doi.org/10.18599/grs.2020.4.41-54>].
11. *Борисова Л. С.* Асфальтены — наследники генетического кода керогена // *Геология нефти и газа*. 2016. № 6. С. 75–78.
12. *Borisova L. S.* The origin of asphaltenes and main trends in evolution of their composition in during lithogenesis // *Petrol. Chemistry*. 2019. V. 59. № 10. P. 1118–1123. <https://doi.org/10.1134/S0965544119100037>
13. *Kontorovich A., Timoshina I.* Biomarker hydrocarbons in oils and bitumens of Precambrian and Lower Cambrian of the Nepa-Botuoba antecline (Siberian platform) // *The 24th International Meeting on Organic Geochemistry (Bremen, Germany, 6th–11th September 2009): Book of Abstracts*. Bremen, University of Bremen: MARUM, 2009. P. 176.
14. *Тимошина И. Д.* Насыщенные и ароматические углеводороды-биомаркеры в нефтях Байкитской антеклизы // *Известия ТПУ*. 2020. Т. 331. № 1. С. 184–194. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/1/2459>
15. *Конторович А. Э., Тимошина И. Д., Соболев П. Н., Наговицин К. Е.* Углеводороды-биомаркеры верхнего протерозоя Майской впадины (восток Сибирской платформы) // *Материалы 8-й Международной конференции «Химия нефти и газа» — (24–28 сентября 2012)*. Томск, 2012. С. 192–196.
16. *Han Y., Horsfield B., Curry D. J.* Control of facies, maturation and primary migration on biomarkers in the

- Barnett Shale sequence in the Marathon 1 Mesquite well, Texas // *Mar. and Petrol. Geol.* 2017. V. 85. P. 106–116. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.04.018>
17. Борисова Л. С., Тимошина И. Д. Закономерности изменения состава и структуры асфальтенов в диа- и катагенезе // *Петролеомика.* 2022. Т. 2. № 1. С. 115–125. <https://doi.org/10.53392/27823857-2022-2-1-115> EDN: MWWBGC [Borisova L. S., Timoshina I. D. Regular trends in variation of the asphaltene composition and structure in dia- and catagenesis // *Petrol. Chemistry.* 2022. V. 62. N 2. P. 229–239. <https://doi.org/10.1134/S0965544122060111>].
  18. Борисова Л. С., Фурсенко Е. А., Костырева Е. А., Тимошина И. Д. Комплекс химических и физических методов получения и исследования компонентов органического вещества пород и нафтидов (методическое руководство). Новосибирск: РИЦ НГУ, 2019. 84 с.
  19. Кендалл М. Дж., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. М.: Наука, 1973. 900 с.
  20. Борисова Л. С., Тимошина И. Д. Геохимия асфальтенов слабозрелого органического вещества // *Геохимия.* 2021. Т. 66. № 3. С. 251–261. <https://doi.org/10.31857/S0016752521030031> [Borisova L. S., Timoshina I. D. Geochemistry of asphaltenes in organic matter of low thermal maturity // *Geochemistry International.* 2021. V. 59. N 3. P. 290–300. <https://doi.org/10.1134/s0016702921030034>].
  21. Тиссо Б., Вельте Д. Образование и распространение нефти. М.: Мир, 1981. 502 с.
  22. Петров Ал. А. Углеводороды нефти. М.: Наука, 1984. 263 с.
  23. Петров Ал. А. Геохимическая типизация нефтей // *Геохимия.* 1994. № 6. С. 876–891.
  24. Конторович А. Э., Бахтуров С. Ф., Башарин А. К., Беляев С. Ю., Бурштейн Л. М., Конторович А. А., Кринин В. А., Ларичев А. И., Ли Году, Меленевский В. Н., Тимошина И. Д., Фрадкин Г. С., Хоменко А. В. Разновозрастные очаги нафтидообразования и нафтидоаккумуляции на Северо-Азиатском кратоне // *Геология и геофизика.* 1999. Т. 40. № 11. С. 1676–1693 [Kontorovich A. E., Bakhturov S. F., Basharin A. K., Belyaev S. Yu., Burshtein L. M., Kontorovich A. A., Krinin V. A., Larichev A. I., Li Goudu, Melenevskii V. N., Timoshina I. D., Fradkin G. S., Khomenko A. V. Heterochronous centers of naphthide formation and accumulation in the North Asian Craton // *Russian Geology and Geophysics.* 1999. V. 40. N 11. P. 1647–1665].
  25. Peters K. E., Moldowan J. M. The biomarker guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments. New Jersey, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1993. 363 p.
  26. Radke M., Welte D. The methylphenanthrene index (MPI): a maturity parameter based on aromatic hydrocarbons // *Advances in Organic Geochemistry, 1981: Proceedings of the 10th International Meeting on Organic Geochemistry, University of Bergen, Norway, 14–18 September 1981.* Wiley, Chichester; New York, 1983, P. 504–512.
  27. 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. 5. № 7. С. 873–883 [Kontorovich A. E., Melenevsky V. N., Ivanova E. N., Fomin A. N. Phenanthrenes, aromatic steranes, and dibenzothiophenes in Jurassic deposits of the West Siberian petroleum province: implications for organic geochemistry // *Russian Geology and Geophysics.* 2004. V. 5. N 7. P. 824–834].
  28. Radke M., Welte D. H., Willsch H. Distribution of alkylated aromatic hydrocarbons and dibenzothiophenes in rocks of the Upper Rhine Graben // *Chemical Geology.* 1991. V. 93. N 3–4. P. 325–341. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(91\)90122-8](https://doi.org/10.1016/0009-2541(91)90122-8)