

## Геохимия органического вещества неопротерозоя на юго-востоке Сибирской платформы

И.Д. Тимошина<sup>1\*</sup>, Л.Н. Болдушевская<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>ООО «РН-КрасноярскНИПИНефть», Красноярск, Россия

В разрезе неопротерозоя (средний и верхний рифей) Алдано-Майской впадины обогащены органическим веществом (ОВ) и могут быть отнесены к нефтематеринским породы малгинской, ципандинской и кумахинской свит. Высокий генерационный потенциал отмечен в малгинской и ципандинской свитах (267–511 мг УВ/г  $C_{оп}$ ). Катагенез ОВ соответствует  $MK_1^2$  ( $T_{max}$  варьирует в пределах 438–443 °С). На основании распределения углеводородов-биомаркеров биопредшественниками ОВ этих свит были в основном разнообразные прокариоты, в том числе цианобактерии (гопаны, ациклические биомаркеры) и в меньшей степени авто- и гетеротрофные эукариоты (наличие стеранов  $C_{27}$ - $C_{30}$ ), обитавшие в докембрийском (наличие 12- и 13-монометилалканов) морском (отсутствие биомаркеров континентального ОВ, распределение ациклических алканов с максимумами на  $C_{16-19}$ , стеранов с близкими концентрациями  $C_{27}$  и  $C_{29}$ ) бассейне, с глинистым осадконакоплением (высокие содержания диастеранов). Судя по отсутствию стеранов в нескольких образцах (отсутствие эукариот в исходном живом веществе), малгинская свита, вероятно, накапливалась частично до возникновения эукариот. В большинстве проб повышены концентрации низкомолекулярных трициканов ( $2C_{19-20}/C_{23-26} > 1$ ), возможно, это связано со спецификой материнской биоты, хотя и не характерно для аквагенного ОВ. Редкий гомологический ряд 2,7-диметилалканов, недавно обнаруженный другими исследователями в некоторых докембрийских толщах, найден в нескольких пробах малгинской и кумахинской свит и не отмечен ни в одном образце ципандинской свиты, что, возможно, является признаком отличия ее биоты, условий ее накопления или эволюции в катагенезе и катагенезе. На отличие ципандинской свиты также указывает высокое содержание этилхолестанов ( $C_{29}/C_{27} = 2.5$ ).

**Ключевые слова:** Сибирская платформа, докембрий, нефтематеринские формации, органическая геохимия, углеводороды-биомаркеры

**Для цитирования:** Тимошина И.Д., Болдушевская Л.Н. (2020). Геохимия органического вещества неопротерозоя на юго-востоке Сибирской платформы. *Георесурсы*, 22(4), с. 41–54. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.4.41-54>

### Введение

Актуальность изучения обогащенных органическим веществом нефтематеринских пород, молекулярных исследований битумоидов и нафтидов рифейских отложений Сибирской платформы определяется, в частности, необходимостью использования достоверных входных данных для анализа нефтяных систем, оценки ресурсов и оценки рисков заполнения ловушек для залежей нефти и газа. Для большинства нефтей из коллекторов докембрия и нижнего кембрия Сибирской платформы считаются нефтематеринскими мощные обогащенные органическим веществом (ОВ) толщи неопротерозоя (рифей) в ее обрамлении и на окраинах (Непско-Ботуобинская антеклиза..., 1986; Конторович и др., 1994а,б, 1996, 1999 и др.). Однако в основном докембрийские отложения содержат ОВ слишком высокой термической зрелости, затрудняющей интерпретацию результатов геохимических исследований вплоть до их неприменимости для генетической и катагенетической диагностики. На востоке Сибирской платформы развиты докембрийские образования, включающие не подвергавшееся метаморфизму ОВ и поэтому представляющие огромный интерес для

изучения методами органической геохимии. В пределах Алдано-Майской впадины на юго-востоке Сибирской платформы локализованы неопротерозойские образования, содержащие умеренно преобразованное ОВ, которое является объектом настоящего исследования. В рамках данной работы геохимические исследования охватывают последовательность свит (Решения Всесоюзного стратиграфического совещания..., 1983) среднерифейской керпильской (малгинская и ципандинская свиты) и верхнерифейских лахандинской (кумахинская, мильконская, нельканская, игниканская свиты) и уйской (кандыкская свита) серий возрастом 1100–1000 млн лет, 1000–850 млн лет и 850–650 млн лет, соответственно (Хоментовский, 1996). Изучение ОВ докембрия Алдано-Майской впадины ранее проводилось многими исследователями (Баженова и др., 1981; Матвиенко, Соболев, 1984; Соболев, 1987; Баженова, 2010; Можегова, 2010; Баженова и др., 2011, 2014; Дахнова и др., 2013, 2014; Парфенова и др., 2014; Сафронов и др., 2015; Шиганова и др., 2015; Сулова и др., 2015, 2017; Соболев и др., 2017; Парфенова, Сулова, 2019 и др.), и настоящая работа дополняет их.

Состав углеводородов-биомаркеров битумоидов пород зависит от состава биоты, особенностей осадконакопления, процессов диагенеза и катагенеза, смешивания флюидов на путях миграции. Выполненные исследования свидетельствуют о существенном влиянии миграционных явлений на состав битумоидов рифейских толщ района.

\* Ответственный автор: Ирина Дмитриевна Тимошина  
E-mail: [TimoshinaID@ipgg.sbras.ru](mailto:TimoshinaID@ipgg.sbras.ru)

© 2020 Коллектив авторов

**Объект и методы исследований**

Образцы малгинской, ципандинской, кумахинской, мильконской, нельканской, игниканской и кандыкской свит в разное время отобраны из обнажений р. Мая в пределах Алдано-Майской впадины на юго-востоке Сибирской платформы и переданы в Лабораторию геохимии нефти и газа Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН (ИНГГ СО РАН) для геохимических исследований. Геохимические исследования включали определения концентраций пиролитических и изотопных характеристик органического углерода ( $C_{орг}$ ), концентраций растворимых в хлороформе битумоидов ( $b_{хл}$ ), анализ группового состава битумоидов, а также состава углеводородов (УВ), в том числе методами газожидкостной хроматографии (ГЖХ) и хромато-масс-спектрометрии (ХМС). Все методики являются традиционными в Лаборатории геохимии нефти и газа ИНГГ СО РАН, их детальное описание дано в работе (Суслова и др., 2017).

В настоящей работе проведено сопоставление данных пиролиза и изотопного анализа ОВ с характеристиками насыщенных УВ-биомаркеров, полученных с помощью ХМС, для выяснения генезиса источников, диагенетических обстановок и катагенетической преобразованности ОВ. Некоторые результаты исследований настоящей коллекции докладывались отдельными фрагментами в материалах конференций (Тимошина и др., 2010; Kontorovich et al., 2011a, 2011b; Конторович и др., 2012; Kontorovich et al., 2013; Тимошина и др., 2015); эти материалы включены в анализ общей картины геохимических показателей.

**Результаты исследований и обсуждение**

В изученной коллекции обогащены  $C_{орг}$  ( $\geq 1$ ) 2 пробы аргиллита (5.5 и 13.6 % на породу) и 2 пробы алевролита

(2.5 и 3.7 % на породу) малгинской свиты, аргиллит ципандинской свиты (3.3 % на породу), аргиллиты кумахинской свиты (1.0 и 1.1 % на породу) и песчаник кандыкской свиты (1.2 % на породу); в остальных образцах содержания ОВ  $< 1$  % на породу (табл. 1).

Обогащено изотопом  $^{13}C$  ОВ малгинской свиты ( $\delta^{13}C_{орг} = (-33.2) - (-31.5) \text{‰}$ ) (Суслова и др., 2017), а также кумахинской и игниканской свит ( $\delta^{13}C_{орг} = (-32.9) - (-30.6) \text{‰}$ ) (табл. 1). Высокий генерационный потенциал (водородный индекс  $HI > 160 \text{ мг УВ/г } C_{орг}$ ) отмечен в нескольких пробах изученной коллекции: 1 аргиллит малгинской ( $C_{орг} > 1$ ), все образцы ципандинской (среди них 1 образец с  $C_{орг} > 1$ ), доломит мильконской ( $C_{орг} < 1$ ), известняк игниканской ( $C_{орг} < 1$ ), песчаник ( $C_{орг} > 1$ ) и 1 известняк ( $C_{орг} < 1$ ) кандыкской свит (табл. 1, рис. 1).

Три образца локализованы в области керогена типа III (рис. 1), причиной этого может быть высокий катагенез, снижающий HI или/и примесь более молодых мигрировавших твердых битумов. В коллекции, вошедшей в настоящее исследование, посвященное главным образом УВ-биомаркерам, только 1 образец малгинской свиты изучен методом пиролиза, однако результаты по другим образцам малгинской свиты (их битумоиды не изучены) подтверждают высокий генерационный потенциал ОВ малгинской свиты (рис. 1), эти образцы помещены в виде точек без номеров проб. Причем характерный для образцов малгинской свиты высокий HI практически не зависит от концентраций  $C_{орг}$  (рис. 2).

На основании пиролитических и биомаркерных характеристик установлено, что степень преобразованности ОВ малгинской свиты соответствует мезокатагенезу  $MK_1^1 - MK_1^2$ , а в наиболее погруженных участках могла достигать  $MK_2$  (Матвиенко, Соболев, 1984; Соболев, 1987;

№ п/п	Возраст	Серия	Свита	Порода	$C_{орг}$ , % на породу	$\delta^{13}C_{орг}$ , ‰	Пиролиз			
							мг УВ/ г породы		HI= мг УВ/г $C_{орг}$	$T_{max}$ , °C
							S1	S2		
1				аргиллит	5.5	-	1.1	28.1	511	441
2				мальта	-	-	-	-	-	-
3				керит	-	-	-	-	-	-
4				известняк	0.6	-	-	-	-	-
5			малгинская	алевролит	3.7	-	-	-	-	-
6				алевролит	2.5	-	-	-	-	-
7				аргиллит	13.6	-	-	-	-	-
8	R <sub>2</sub>	керпыльская		аргиллит	0.1	-	-	-	-	-
9				аргиллит	0.1	-	-	-	-	-
10				аргиллит	0.4	-	-	-	-	-
11			малгинская-	известняк	0.02	-	-	-	-	-
12			ципандинская	известняк	0.5	-	0.1	0.5	111	443
13				известняк	0.7	-	0.3	2.6	395	442
14			ципандинская	известняк	0.8	-	0.1	2.0	267	443
15				аргиллит	3.3	-	0.1	14.5	434	430
16				аргиллит	1.0	-32.9	0.1	0.7	68	442
17			кумахинская	аргиллит	1.1	-32.6	0.1	0.8	71	438
18				известняк	0.03	-	-	-	-	-
19		лахандинская	мильконская	доломит	0.2	-	0.1	0.4	205	430
20			нельканская	доломит	0.03	-	-	-	-	-
21	R <sub>3</sub>		игниканская	известняк	0.1	-30.6	3.9	10.2	161	444
22				доломит	0.1	-	-	-	-	-
23				доломит	0.1	-	0.03	0.1	148	450
24		уйская	кандыкская	известняк	0.1	-	0.1	0.2	142	456
25				известняк	0.1	-	0.1	0.2	191	443
26				песчаник	1.2	-	0.1	2.8	230	432

Табл. 1. Концентрации, пиролиз и изотопный состав органического углерода в породах рифея Алдано-Майской впадины

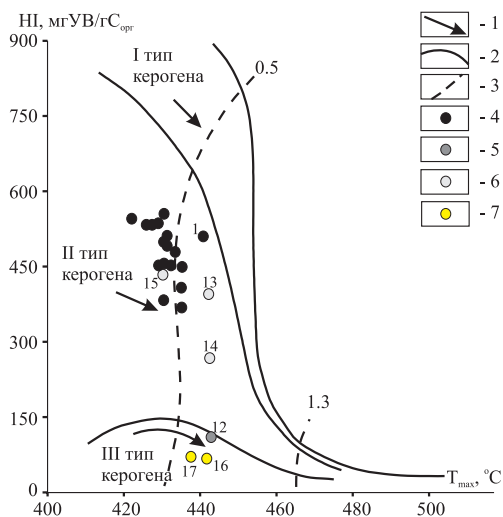


Рис. 1. Диаграмма HI-T<sub>max</sub> для органического вещества потенциально нефтематеринских пород р. Мая: 1 – направленность изменений величин HI и T<sub>max</sub> в катагенезе, 2 – линии, ограничивающие максимальные значения водородного индекса для трех типов органического вещества (I – аквагенного озерного, II – аквагенного морского, III – террагенного, связанного с высшей наземной растительностью), 3 – изолинии R<sup>o</sup><sub>max</sub> ограничивающие главную зону нефтеобразования; свиты: 4 – малгинская, 5 – малгинская и ципандинская, 6 – ципандинская, 7 – кумахинская; номера около кружков соответствуют номерам проб в табл. 1

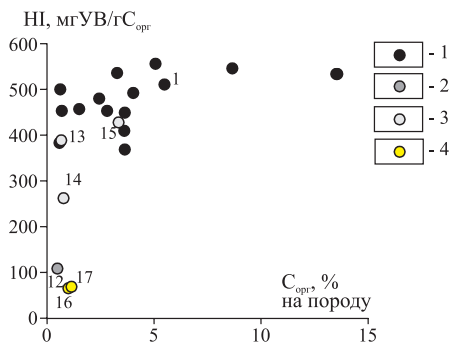


Рис. 2. Взаимосвязь концентраций C<sub>орг</sub> и водородного индекса HI в органическом веществе потенциально нефтематеринских пород из обнажений р. Мая: 1 – малгинская, 2 – малгинская и ципандинская, 3 – ципандинская, 4 – кумахинская; номера около кружков соответствуют номерам проб в табл. 1

Дахнова и др., 2013; Баженова и др., 2014; Сулова и др., 2015, 2017; Чалая и др., 2015). Судя по пиролитической характеристике T<sub>max</sub> (температура максимального выхода УВ пика S<sub>2</sub>, керогеновой составляющей ОВ) образцов настоящей коллекции, пригодных к диагностике (C<sub>орг</sub> > 1 %), ОВ малгинской и кумахинской свит преобразовано в пределах МК<sub>1</sub><sup>2</sup> (T<sub>max</sub> = 438–442 °C); зрелость ОВ ципандинской и кандыкской свит ниже. Не исключено, что в некоторых образцах за счет возможного присутствия битумов HI может быть завышен, а T<sub>max</sub> занижена.

Высокие концентрации битумоидов (b<sub>хл</sub> > 0.2 % на породу) определены в 3 образцах малгинской свиты и в песчанике кандыкской свиты (табл. 2), однако битумоидный коэффициент β в них (9–16 %) высок и указывает на эпигенетичность битумоида, за исключением аргиллита малгинской свиты, обогащенного C<sub>орг</sub> и автохтонным битумоидом (β = 2.1 %). Обогащенность битумами отмечается по всему разрезу мезо- и неопротерозоя Учуро-Майского

региона (Парфенова, Сулова, 2019), однако в изученной коллекции остальные образцы бедны битумоидом (b<sub>хл</sub> < 0.1 % на породу, в среднем 0.02 % на породу), при этом в основном аллохтонные (β > 10 %) или смешанные (5 % < β < 10 %), автохтонные (β < 5 %) встречаются в 3 аргиллитах малгинской свиты, в 1 известняке нерасчлененных малгинской и ципандинской свит, во всех образцах ципандинской и кумахинской свит и 1 доломите кандыкской свиты.

По нашим данным (табл. 2) и по данным Т.К. Баженовой (Баженова и др., 2014) битумоиды и битумы малгинской свиты обогащены изотопом <sup>12</sup>C (δ<sup>13</sup>C<sub>бит</sub> = (–33.4)–(–31.7) ‰).

Наиболее обогащены асфальтенами (> 10 %) образцы малгинской и ципандинской свит, остальные битумоиды представлены в основном УВ и смолами (рис. 3).

В ряду n-алканов, идентифицированных по газо-жидкостной хроматограмме (ГЖХ), максимумы приходятся в основном на nC<sub>17-19</sub> (табл. 3, рис. 4); лишь в 3 образцах максимум смещен в область высокомолекулярных соединений nC<sub>23-27</sub> – это мальта малгинской свиты и бедные ОВ известняк неразделенных малгинской и ципандинской свит и доломит кандыкской свиты. В битумоиде из известняка неразделенных малгинской и ципандинской свит отчетливое превышение нечетных УВ над четными, что отразилось на CPI (2.0), следовательно, возможна примесь более молодых незрелых террагенных битумоидов. В доломите мильконской свиты повышены концентрации четных nC<sub>28</sub> и nC<sub>30</sub>, что может быть как признаком незрелого материнского ОВ из карбонатов или сверхсолонных обстановок, так и высокого катагенеза (Тиссо, Вельте, 1981; Peters et al., 2007). Образец карбонатный, и результаты пиролиза соответствуют незрелому ОВ, однако битумоид обогащен аллохтонными примесями, поэтому возможна и другая причина.

В небольших, но идентифицируемых количествах (5–9 % на ациклические УВ) в образцах кумахинской и игниканской свит зафиксированы 12- и 13-монометилалканы (табл. 3) (Тимошина и др., 2010; Kontorovich et al., 2011a, 2011b, 2013), в кумахинской свите даже до 15 % (Парфенова, Сулова, 2019). Эти соединения считаются характерными для морских водорослей и цианобактерий докембрия (Петров, 1984; Peters et al., 2007 и др.). Ранее 12- и 13-монометилалканы были обнаружены в нефтях из коллекторов рифея – нижнего кембрия Сибирской платформы (Петров, 1984; Конторович и др., 1996, 1999; Kontorovich et al., 2005; Тимошина, 2004, 2005), в нефтях и битумоидах нефтематеринских пород венда Омана (Grantham et al., 1988; Ким, 2004). В малгинской свите ранее также находили 12- и 13-монометилалканы (Чалая и др., 2015), и в изученной коллекции они обнаружены в нескольких образцах этой свиты, но в ничтожных количествах (табл. 3). В небольших концентрациях 12- и 13-монометилалканы обнаружены в верхнерифейских нерюенской и кандыкской свитах и вендской сарданинской свите скв. Усть-Майская-336 (Соболев и др., 2017). В следовых количествах 12- и 13-монометилалканы найдены в породах нельканской свиты (Парфенова, Сулова, 2019).

Низкие отношения изопреноидных УВ к алканам нормального строения Pr/nC<sub>17</sub> и Ph/nC<sub>18</sub>, отмеченные во всех битумоидах, содержащих ациклические УВ (табл. 3), являются признаком хорошей сохранности УВ от процессов

№ п/п	b <sub>хл.</sub> % на породу	β, %	Групповой состав, % на битумоид					δ <sup>13</sup> C <sub>ув.</sub> , ‰
			насыщенные УВ	ароматические УВ	смолы	асфальтены	сумма смол и асфальтенов	
1	–	–	6.5	28.0	32.4	33.0	65.4	–32.7
2	–	–	28.9	22.0	20.7	28.5	49.2	–31.7
3	–	–	3.9	7.9	25.1	63.1	88.2	–33.4
4	0.07	8.4		24.1	58.8	17.1	75.9	–
5	0.44	9.0	17.6	18.1	46.4	17.9	64.3	–
6	0.33	10.1	14.6	12.8	50.0	22.6	72.6	–
7	0.38	2.1	11.0	24.3	52.5	12.3	64.7	–
8	0.001	1.5	27.1	6.8	66.2	не опр.	66.2	–
9	0.018	11.0	45.0	9.5	43.9	1.6	45.5	–
10	0.002	0.4	28.7	7.8	63.5	не опр.	63.5	–
11	0.002	6.4	17.1	2.3	80.6	не опр.	80.6	–
12	0.014	2.1	26.5	6.8	66.7	не опр.	66.7	–
13	0.033	3.8	9.2	16.1	42.7	32.1	74.8	–
14	0.029	2.8	12.2	14.2	46.6	27.1	73.7	–
15	0.094	2.1	10.4	17.5	60.9	11.3	72.2	–
16	0.027	2.1	41.1	12.0	45.1	1.9	46.9	–
17	0.017	1.1	19.7	25.0	48.6	6.2	54.8	–
18	0.003	7.3	31.0	12.9	56.0	не опр.	56.0	–
19	0.036	12.9	38.0	3.1	48.3	10.6	58.9	–
20	0.002	5.3	31.0	13.7	55.4	не опр.	55.4	–
21	0.03	16.3	62.4	13.4	21.9	2.4	24.3	–
22	0.005	4.8	45.4	5.1	49.5	не опр.	49.5	–
23	0.011	11.3	50.8	6.4	39.7	3.1	42.8	–
24	0.011	6.8	67.8	3.0	26.0	3.2	29.2	–
25	0.013	10.9	39.4	13.7	47.0	не опр.	47.0	–
26	0.26	16.0	47.4	7.9	44.4	0.2	44.6	–

Табл. 2. Концентрации, групповой и изотопный состав углерода битумоидов в породах рифея Алдано-Майской впадины. Желтым цветом выделены номера образцов битумов и содержащих примесь аллохтонных битумоидов согласно битумоидному коэффициенту β (>5 %)

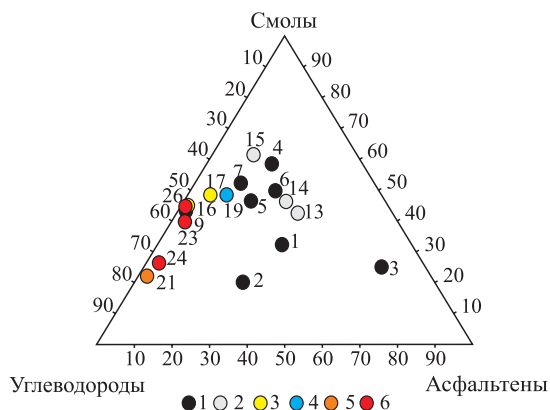


Рис. 3. Тригонограмма группового состава битумоидов рифея из обнажений р. Мая, свиты: 1 – малгинская, 2 – ципандинская, 3 – кумахинская, 4 – мельконская, 5 – игниканская, 6 – кандыкская (номера образцов соответствуют табл. 2)

биodeградации. Отношения Pr/nC<sub>17</sub> и Ph/nC<sub>18</sub> низкие даже в мальте, что дает возможность предположить, что у нее остаточного-миграционного происхождения. В большинстве битумоидов пристан превышает фитан, причем в 4 малгинских, 1 ципандинском и 1 кандыкском примерно вдвое; в 5 образцах – 1 малгинском, 1 ципандинском, 1 игниканском и 2 кандыкских пристан и фитан находятся в равных концентрациях (табл. 3). Лишь в 3 битумоидах малгинской и ципандинской свит фитан превышает пристан, что является признаком аквагенности УВ.

В 10 образцах коллекции отмечается в небольших концентрациях гомологический ряд 2,7-диметилалканов: в малгинской (№ 8, 10), малгинской и ципандинской (№ 11, 12), кумахинской (№ 16, 17), мельконской (№ 18, 19), нельканской (№ 20) и кандыкской (№ 25) свитах – во всех

свитах, кроме ципандинской и игниканской. На рис. 5 показаны хроматограмма по общему ионному току и масс-хроматограммы по m/z 71 и m/z 127 для образца № 10 малгинской свиты. Отсутствие этих соединений в образцах ципандинской свиты, возможно, является следствием уникальности ее биоты, условий ее накопления или эволюции в диагенезе и катагенезе. Ранее эти соединения были найдены В.А. Каширцевым в аргиллитах вендской марнинской свиты Присаянья (Каширцев и др., 2009) и в ОВ кумахинской и нельканской свит (Парфенова, Сулова, 2019). Во всех случаях найдены только гомологи с четным числом атомов углерода в молекуле.

Среди полициклических изопренов во всех образцах терпанов, идентифицируемых по m/z 191, значительно больше, чем стеранов, идентифицируемых по m/z 217 (стераны/терпаны ≤0.3 (табл. 4)), что указывает в основном на прокариотический источник исходного ОВ (Peters et al., 2007).

В терпанах чаще преобладают гопаны; отношение гопаны/трицикланы <1 только в 2 битумоидах малгинской свиты, в битумоидах кумахинской, игниканской и кандыкской свит (табл. 4, рис. 6). Высокие концентрации гопанов по сравнению с трицикланами могут быть признаком контаминации более молодыми террагенными битумоидами или/и низкого катагенеза, но также могут быть следствием миграционных процессов в слабопроницаемой среде (Конторович, Тимошина, 2009), т.к. молекулы трицикланов более миграционноспособны. Высокие концентрации гопанов встречены в большинстве образцов, в том числе в большинстве автохтонных битумоидов, и, возможно, это указывает на преимущественно бактериальное материнское ОВ. В ряду гопанов в большинстве образцов преобладает гопан C<sub>30</sub> (рис. 7). В трех образцах максимум

№ п/п	Максимум в <i>n</i> -алканах	Максимум в ациклических изопреноидах	Соотношения ациклических углеводов					12-,13-моно-метилалканы, % на ациклич. УВ	Наличие ряда 2,7-диметил-алканов
			Pr/Ph	Pr/ <i>n</i> -C <sub>17</sub>	Ph/ <i>n</i> -C <sub>18</sub>	<i>n</i> -C <sub>27</sub> / <i>n</i> -C <sub>17</sub>	CPI		
1	C <sub>16</sub>	C <sub>19</sub>	1.8	0.3	0.2	0.1	1.0	–	–
2	C <sub>23</sub>	C <sub>20</sub>	0.7	0.5	0.3	11.6	1.2	1.0	–
3	–	–	–	–	–	–	–	–	–
4	C <sub>17</sub> , C <sub>19</sub>	C <sub>19</sub>	1.5	0.3	0.2	0.2	1.0	3.8	–
5	C <sub>16</sub>	C <sub>19</sub>	2.4	0.3	0.2	0.1	1.0	2.9	–
6	C <sub>17</sub>	C <sub>19</sub>	2.0	0.4	0.2	0.2	1.0	2.9	–
7	C <sub>16</sub>	C <sub>18</sub> , C <sub>19</sub>	2.1	0.2	0.1	0.1	1.1	1.9	–
8	C <sub>17</sub>	C <sub>20</sub> , C <sub>19</sub>	1.0	0.3	0.4	0.1	1.2	–	+
9	C <sub>16</sub>	C <sub>19</sub>	1.3	0.4	0.6	0.2	1.0	–	–
10	C <sub>18</sub>	C <sub>20</sub>	0.8	0.3	0.3	0.1	1.3	–	+
11	C <sub>27</sub>	C <sub>20</sub>	0.6	0.5	0.8	1.4	2.0	–	+
12	C <sub>17</sub>	C <sub>19</sub>	1.3	0.5	0.4	0.2	1.1	–	+
13	C <sub>17</sub>	C <sub>19</sub>	1.4	0.3	0.2	0.1	1.0	–	–
14	C <sub>19</sub>	C <sub>20</sub> , C <sub>19</sub>	1.0	0.2	0.2	0.2	1.0	–	–
15	C <sub>18</sub>	C <sub>19</sub>	1.8	0.3	0.2	0.1	1.1	–	–
16	C <sub>17</sub>	C <sub>18</sub>	1.4	0.2	0.2	0.1	1.1	7.3	+
17	C <sub>17</sub>	C <sub>19</sub>	1.3	0.3	0.3	0.1	1.1	9.0	+
18	C <sub>17</sub>	C <sub>19</sub>	1.2	0.4	0.3	0.1	1.1	–	+
19	C <sub>16</sub>	C <sub>19</sub>	1.3	0.4	0.5	0.1	0.6	–	+
20	C <sub>17</sub>	C <sub>19</sub>	1.1	0.4	0.5	0.3	1.4	–	+
21	C <sub>19</sub>	C <sub>19</sub> , C <sub>20</sub>	1.0	0.2	0.2	0.4	1.0	5.0	–
22	C <sub>25</sub>	C <sub>19</sub> , C <sub>20</sub>	1.0	0.2	0.2	1.4	1.0	–	–
23	C <sub>17</sub>	C <sub>19</sub>	1.3	0.2	0.1	0.4	1.0	–	–
24	C <sub>18</sub>	C <sub>19</sub>	1.5	0.2	0.1	0.4	1.0	–	–
25	C <sub>18</sub>	C <sub>20</sub> , C <sub>19</sub>	1.0	0.2	0.2	0.4	1.0	–	+
26	C <sub>17</sub>	C <sub>19</sub>	1.9	0.5	0.3	0.1	1.1	–	–

Табл. 3. Ациклические насыщенные углеводороды-биомаркеры в битумоидах рифея Алдано-Майской впадины. Желтым цветом выделены номера образцов битумов и содержащих примесь аллохтонных битумоидов согласно битумоидному коэффициенту  $\beta$  ( $>5\%$ )

приходится на C<sub>31</sub>, причина не ясна, но скорее всего связана со спецификой ОВ, поскольку все три образца обогащены ОВ – это керит малгинской свиты и обогащенные C<sub>орг</sub> и автохтонным битумоидом аргиллиты ципандинской и кумахинской свит. Концентрации гомоганов C<sub>31-35</sub> в основном снижаются с ростом молекулярной массы (рис. 7), отношение гомоганов C<sub>35</sub>/C<sub>34</sub> меньше 1 (табл. 4), что указывает на диагенетические преобразования в восстановительных обстановках без сероводородного заражения (Peters, Moldowan, 1993). В двух образцах малгинской свиты C<sub>35</sub>/C<sub>34</sub>  $>1$ ; возможно время от времени возникал избыток серы в осадке. Отношение триснорнеогана C<sub>27</sub> к трисноргану C<sub>27</sub> (Ts/Tm) варьирует широко – от очень низких значений ( $<0.5$ ), тяготеющих к малгинской и ципандинской свитам, до очень высоких ( $>5$ , даже до 21.7) в игниканской и кандыкской свитах. Повышение может быть связано с террагенным (в случае миграции битумоидов из более молодых пород) источником ОВ (Waples, Machihara, 1990) и/или окислительными условиями в диагенезе (Moldowan et al., 1986), и/или высокой катагенетической преобразованностью (Петров, 1994), а также может указывать на высокую карбонатность осадка в бассейне накопления ОВ (Philp, 1985; Rüllkötter, Marzi, 1988). Возможно, последняя причина актуальна для карбонатов мильконской, игниканской и кандыкской свит – в таком случае битумоиды №№ 19, 21, 23–25 могут рассматриваться не как аллохтонные, а как паравтохтонные, характеризующие вмещающую свиту. Однако, поскольку в автохтонном (по  $\beta$ ) битумоиде кандыкской свиты Ts/Tm более низкое, чем в аллохтонном, и в целом Ts/Tm  $>2$  обнаружено только в образцах с  $\beta >5$  (табл. 2, 4), логично предположить, что повышение Ts/Tm связано

с миграционными процессами. В нескольких битумоидах повышено содержание гаммацераана (табл. 4) – в битумах и известняке малгинской свиты (1.2–6.2 % на сумму терпанов), в аргиллите кумахинской (1.2 %) и известняке игниканской (6.8 % на сумму терпанов) свит, что указывает на высокую соленость воды в бассейне накопления ОВ (Петров, 1994). В то же время гаммацераан устойчив и накапливается в процессе биодеградации (Waples, Machihara, 1990, 1991), с которой может быть связано повышение его концентраций по крайней мере в малгинском керите. В эпигенетичных битумоидах игниканской (№ 21) и кандыкской (№№ 24, 25, 26) свит обнаружена высокая концентрация 17 $\alpha$ -диагопана C<sub>30</sub> (рис. 8).

В публикациях (Volkman et al., 1983; Philp, Gilbert, 1986) этот биомаркер отнесен к индикаторам континентальных угленосных толщ, однако причиной появления 17 $\alpha$ -диагопана C<sub>30</sub> может быть и бактериальный вклад в осадки, содержащие глины, откладывавшиеся в окислительных или субокислительных обстановках (Peters et al., 2007). На масс-фрагментограммах терпанов в битумоидах из известняков игниканской (№ 21) и кандыкской (№№ 24, 25) свит (рис. 8) пик, помеченный знаком вопроса, возможно, является гомоганом. В образце игниканской свиты и образце № 25 кандыкской свиты повышено также содержание 17 $\beta$ ,21 $\alpha$ -норморетана C<sub>29</sub>. Высокие концентрации моретанов и наличие гомогана при низком содержании 17 $\alpha$ ,21 $\beta$ -гопанов, не наблюдающиеся в других образцах, могут быть признаком контаминации этих битумоидов более молодыми слабозрелыми УВ (Peters et al., 2007).

В ряду трицикланов в большинстве проб (15 образцов) доминируют низкомолекулярные C<sub>21</sub>, а в 2 известняках игниканской и кандыкской свит – C<sub>19</sub> (рис. 9). Характерный

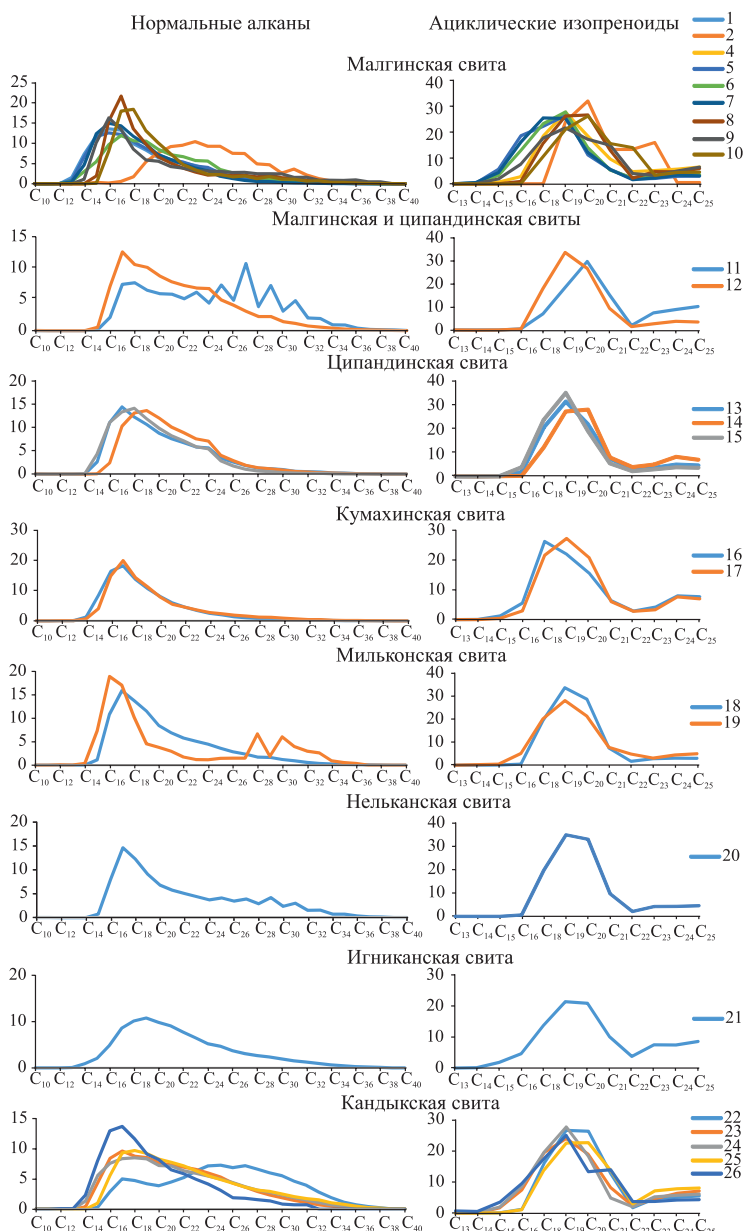


Рис. 4. Ациклические углеводороды-биомаркеры в битумоидах рифея из обнажений р. Мая (номера образцов соответствуют табл. 3)

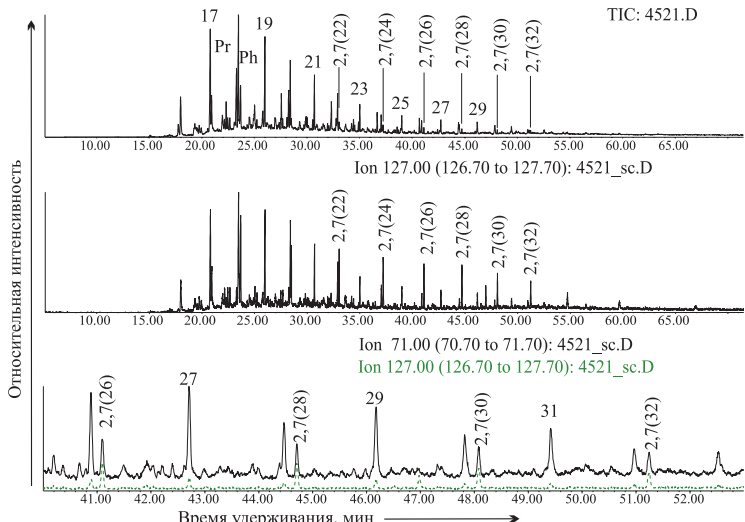


Рис. 5. Хроматограмма по общему ионному току и масс-фрагментограммы терпанов по  $m/z$  71 и  $m/z$  127 в битумоиде образца № 10 малгинской свиты (17–31 – пики  $n$ -алканов, Pr и Ph – пристан и фитан, 2,7(22)–2,7(32) – пики 2,7-диметилалканов)

для аквагенного ОВ максимум на  $C_{23}$  (Конторович и др., 1999) обнаружен в 3 аргиллитах малгинской свиты, в известняке неразделенных малгинской и ципандинской свит, в доломите и песчанике кандыкской свиты. В 4 пробах (в том числе в малгинских битумах) отмечаются высокие концентрации высокомолекулярных трицикланов  $C_{31}$  и  $C_{28}$ , при этом трициклановый индекс  $2C_{19-20}/C_{23-26} < 1$  (табл. 4), что указывает на аквагенное ОВ (Конторович и др., 1999). Низкий трициклановый индекс отмечен еще в нескольких пробах, причем не всегда совпадает с максимумом на  $C_{23}$ . В большинстве проб коллекции  $2C_{19-20}/C_{23-26} > 1$ , что не характерно для УВ, имевших источником аквагенные толщи. Причина не ясна, возможно, это связано со спецификой материнской биоты.

Недавние исследования датируют неопротерозоем появление первых эукариот, сопровождающееся находками стеранов  $C_{27}$  (около 800 млн лет назад) и единичными находками характерных для губок стеранов  $C_{28}$  до предвендского оледенения, и массовым появлением остальных стеранов в узкий предвендский промежуток времени 659–645 млн лет, ознаменовавшийся расцветом водорослевой биоты (Brocks et al., 2016, 2017). В мировой литературе есть свидетельства находок стеранов (Summons, Walter, 1990; Pratt et al., 1991; Bazhenova, Arefiev, 1996; Berney, Pawlowski, 2006) и отсутствия таких (Flannery, George, 2014; Blumenberg et al., 2012; Luo et al., 2015) в донеопротерозойское время. В породах рифея Байкитской антеклизы стераны присутствуют на всех возрастных уровнях, и там, где они поддаются идентификации, отмечены все стераны  $C_{27-30}$ , с близкими концентрациями  $C_{27}$  и  $C_{29}$  (Тимошина, 2005 и др.), а в нефтях отмечены как отсутствие стеранов, так и наличие их, причем с двумя типами распределения – с примерно равными концентрациями  $C_{27}$  и  $C_{29}$  и с режимом преобладанием  $C_{29}$  (Конторович и др., 1996, 1999, 2005, 2011; Тимошина, 2020; и др.). Ранее в ОВ малгинской свиты отмечалось как наличие стеранов (Чалая и др., 2015), так и отсутствие их (Сулова и др., 2017) или следовые количества (Баженова и др., 2014; Дахнова и др., 2014).

В изученной коллекции образцов стераны отсутствуют в 3 (№№ 5, 6, 7) из 10 образцов малгинской свиты (табл. 4), причем это образцы, богатые  $C_{орг}$  (табл. 1). Можно было бы предположить, что биота малгинского времени вообще не содержала эукариот, а стераны в бедных ОВ образцах (№№ 4, 8, 9, 10) и в битумах (№№ 2 и 3) аллохтонные, однако стераны найдены в автохтонном (судя по низким концентрациям УВ и высоким – асфальтенов (табл. 2)) битумоиде богатого  $C_{орг}$  малгинского аргиллита – обр. № 1 (табл. 1, 4), а также ранее обнаружены другими учеными (Баженова и др., 2014; Дахнова и др., 2014; Чалая и др., 2015). Следовательно, возможно, малгинское время было рубежом возникновения первых эукариот. Битумоиды всех остальных образцов содержат стераны, кроме аллохтонного битумоида из песчаника кандыкской свиты. Возможно, этот

№ п/п	Стераны					Стераны/прегнаны	Стераны C <sub>27-30</sub> /терпаны	Терпаны			
	Диа/Регул	C <sub>29</sub> /C <sub>27</sub>	C <sub>29</sub> 20S/ C <sub>29</sub> 20(S+R)	C <sub>29</sub> ββ(20S+20R)/ C <sub>29</sub> αα20R	Ts/Tm в гопанах			C <sub>35</sub> /C <sub>34</sub> в гомогопанах	2C <sub>19-20</sub> / C <sub>23-26</sub> в трицикланах	Гопаны C <sub>27-35</sub> / трицикланы C <sub>19-31</sub>	
1	0.4	1.4	0.6	1.8	—	—	0.5	0.5	1.4	3.7	
2	0.3	1.6	0.4	0.5	22.9	0.1	0.3	0.3	0.6	15.1	
3	0.2	1.0	0.4	2.5	27.2	0.3	1.1	2.0	0.2	7.6	
4	0.4	1.1	0.4	2.8	12.6	0.2	0.6	0.6	0.9	4.3	
5	—	—	—	—	—	—	0.8	0.5	1.8	4.0	
6	—	—	—	—	—	—	0.8	0.4	1.6	4.1	
7	—	—	—	—	—	—	0.5	0.5	2.2	2.5	
8	0.5	1.4	0.4	2.3	5.3	0.2	0.8	0.9	0.5	2.5	
9	0.4	1.6	0.4	1.1	9.5	0.1	3.4	0.7	0.8	0.8	
10	0.4	1.0	0.3	1.8	1.5	0.2	0.8	1.1	1.1	0.6	
11	0.5	1.3	0.4	1.9	6.9	0.3	0.9	0.9	0.4	2.2	
12	0.4	1.3	0.3	1.5	5.2	0.1	1.2	0.5	1.4	2.4	
13	0.4	1.7	0.5	0.7	4.6	0.02	0.3	0.5	1.7	4.6	
14	0.4	1.5	0.5	1.2	3.5	0.03	0.7	0.5	1.8	4.0	
15	0.4	2.5	0.4	1.9	6.5	0.02	0.2	0.5	2.0	4.6	
16	0.5	0.9	0.4	1.8	1.4	0.1	0.6	0.5	2.9	0.5	
17	0.4	1.0	0.4	2.5	1.6	0.1	0.6	0.5	2.2	0.6	
18	0.5	1.1	0.4	2.5	2.8	0.2	1.7	0.8	1.1	1.3	
19	0.3	1.8	0.6	2.5	15.9	0.1	4.2	0.5	0.2	1.3	
20	0.5	1.2	0.4	2.4	7.4	0.2	1.0	1.0	0.5	2.3	
21	0.5	0.8	0.5	2.2	2.3	0.04	16.5	0.6	1.4	0.5	
22	0.5	1.0	0.4	3.0	2.8	0.2	1.8	0.9	1.3	0.9	
23	0.7	0.7	0.5	2.6	3.7	0.1	21.7	0.8	0.5	0.4	
24	0.5	1.1	0.4	3.0	4.6	0.1	8.3	0.7	1.8	0.5	
25	0.5	1.1	0.4	2.0	2.6	0.1	13.5	0.5	1.3	0.5	
26	—	—	—	—	—	—	6.2	—	1.1	0.4	

Табл. 4. Соотношения циклических насыщенных углеводородов-биомаркеров в битумоидах рифея Алдано-Майской впадины. Желтым цветом выделены номера образцов битумов и содержащих примесь аллохтонных битумоидов согласно битумоидному коэффициенту β (>5 %)

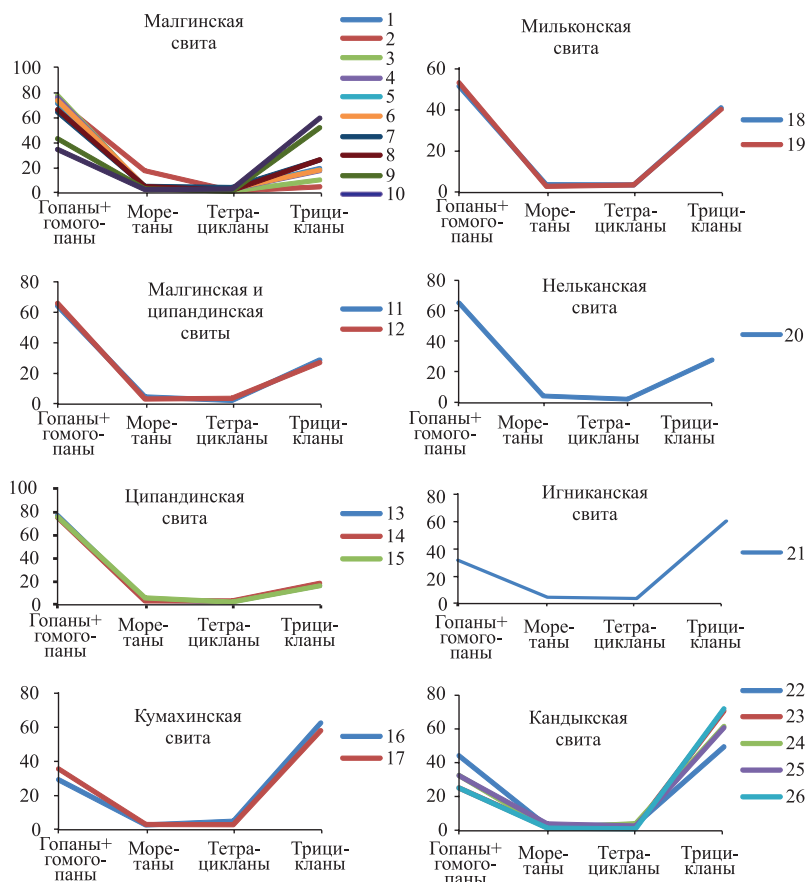


Рис. 6. Терпаны в битумоидах рифея из обнажений р. Мая (номера образцов соответствуют табл. 4)

битумоид более древний (отсутствие эукариот в исходной биоте) (Brocks et al., 1999; Brocks et al., 2003; Peters et al., 2007) или содержал стеранов слишком мало, и они были потеряны при миграции.

Ранее отмечалось, что в стеранах малгинской свиты доминирует C<sub>27</sub>, а в породах лахандинской серии близкие содержания C<sub>27</sub> и C<sub>29</sub> (Чалая и др., 2015). В настоящей работе в большинстве образцов (табл. 4, рис. 10, 11) среди гомологов стеранов C<sub>27-30</sub> отмечены приблизительно равные концентрации стеранов C<sub>27</sub> и C<sub>29</sub>. Такое распределение является типичным для аквагенных черносланцевых отложений и соответствует УВ, генерированным ОВ, предшественниками которого были морские планктонные автотрофные (стеран C<sub>29</sub>), а также гетеротрофные организмы (стеран C<sub>27</sub>) (Петров, 1984). Подобное распределение стеранов отмечено в нефти из протерозойских отложений бассейна Мак-Артур в Австралии, в нефти из отложений венда на Тишковском месторождении Восточно-Европейской платформы (Kontorovich et al., 2005), а также в экстрактах битумоидов из верхнепротерозойских отложений Енисейского кряжа и Байкитской антеклизы (Тимошина, 2005). Некоторое повышение концентраций C<sub>29</sub> (C<sub>29</sub>/C<sub>27</sub> в пределах 1.6–1.8) отмечено в 3 пробах малгинской и ципандинской свит (мальта и образцы с C<sub>орг</sub>

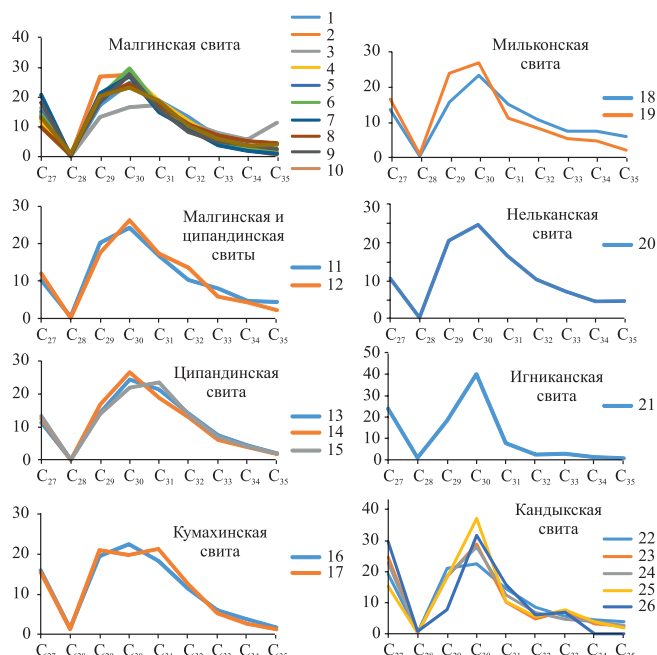


Рис. 7. Гопаны в битумоидах рифея из обнажений р. Мая (номера образцов соответствуют табл. 4)

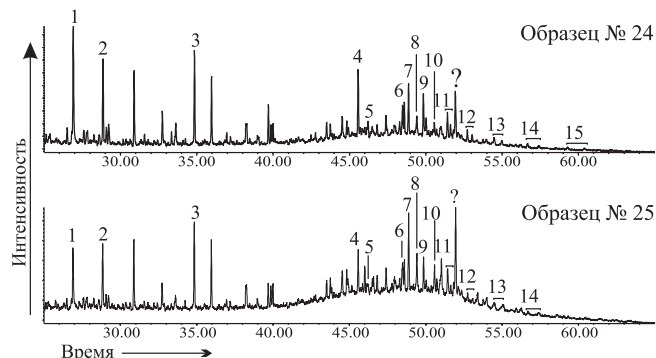


Рис. 8. Масс-фрагментограммы терпанов по  $m/z$  191 в известняках (№ 24 и 25) кандыкской свиты: 1, 2, 3 – трицикланы  $C_{19}$ ,  $C_{20}$ ,  $C_{23}$ ; 4 и 5 – триснорнеогопан (Ts) и трисноргопан (Tm)  $C_{27}$ ; 6 – адиянтан  $C_{29}$ ; 7 – 17 $\alpha$ -диагопан, 8 – 17 $\beta$ ,21 $\alpha$ -норморетан  $C_{29}$ ; 9 – гопан  $C_{30}$ ; 10 – 17 $\beta$ ,21 $\alpha$ -моретан  $C_{30}$ ; 11, 12, 13, 14, 15 – пары гомогопанов  $C_{31}$ ,  $C_{32}$ ,  $C_{33}$ ,  $C_{34}$ ,  $C_{35}$

<1 %) и в доломите мильконской свиты ( $C_{орг} < 1\%$ ), а в аргиллите ципандинской свиты ( $C_{орг} > 1\%$ )  $C_{29}$  превышает  $C_{27}$  более, чем вдвое. Последний образец при высоком  $C_{орг}$  содержит автохтонный битумоид (судя по  $\beta$ ), следовательно, повышение концентрации этилхолестанов не связано с контаминацией аллохтонными битумоидами, а является специфической особенностью докембрийского ОВ, отмеченной в наиболее распространенных нефтях Сибирской платформы (Петров, 1984; Конторович и др., 1996, 1999, 2005; Тимошина, 2004, 2005; Kontorovich et al., 2005). Стераны не идентифицированы, кроме 3 образцов малгинской свиты, также в песчанике кандыкской свиты (№ 26). Возможно, их изначально не было в материнском ОВ (очень древнее) из-за отсутствия эукариот (Brocks et al., 1999; Brocks et al., 2003; Peters et al., 2007). Биodeградация стеранов вслед за  $n$ -алканами могла бы быть вероятной причиной их отсутствия, но в кандыкском битумоиде и в битумоидах малгинской свиты  $n$ -алканы сохранились. На основании распределения УВ-биомаркеров, изотопных и пиролитических характеристик ОВ малгинской,

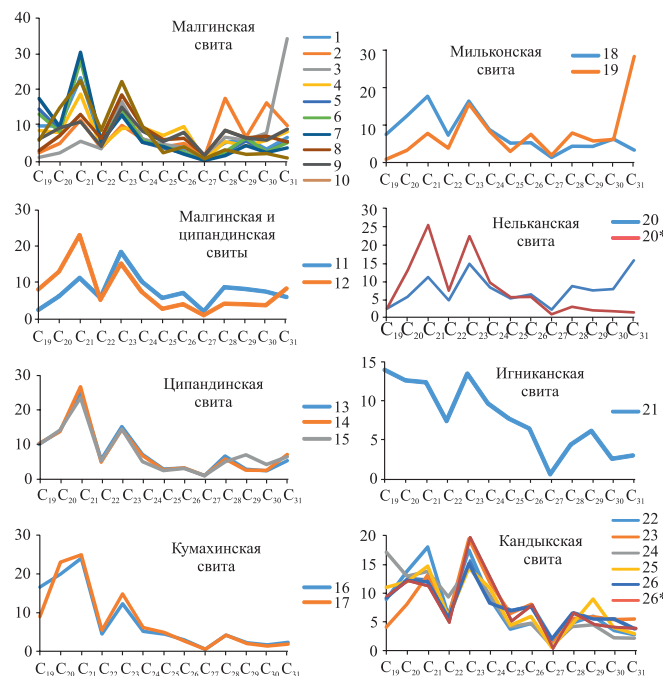


Рис. 9. Трицикланы в битумоидах рифея из обнажений р. Мая (номера образцов соответствуют табл. 4)

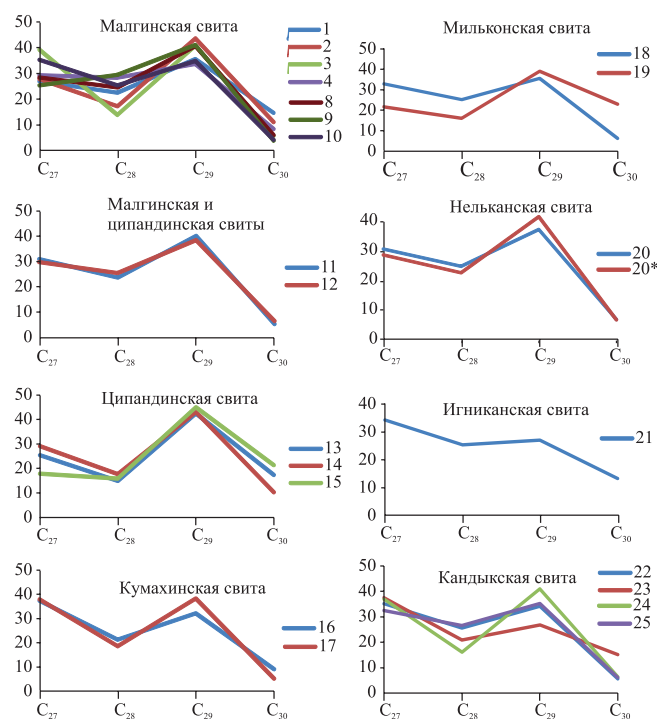


Рис. 10. Стераны в битумоидах рифея из обнажений р. Мая (номера образцов соответствуют табл. 4)

ципандинской и игниканской свит все исследователи определяли как аквагенное (Баженова и др., 1981, 2014; Матвиенко, Соболев, 1984; Соболев, 1987; Дахнова и др., 2013, 2014; Сафронов и др., 2015; Суслова и др., 2015, 2017). Вместе с тем, отмечалось, что находки микрофоссилий в малгинской свите находятся в соответствии с отсутствием или низким содержанием стеранов – это в основном остатки бактерий и цианобактерий; присутствуют лишь единичные находки более крупных акритарх, которые могут быть представителями эукариот (Суслова и др., 2017).

В изученных образцах зафиксированы в основном высокие содержания диастеранов Диа/Регул – 0.4–0.7, в



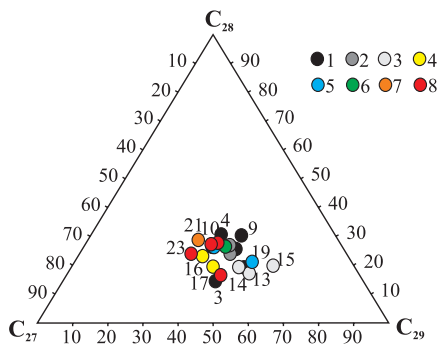


Рис. 11. Тригонограмма стеранов в битумоидах рифея из обнажений р. Мая, свиты: 1 – малгинская, 2 – малгинская и ципандинская, 3 – ципандинская, 4 – кумахинская, 5 – мильконская, 6 – нельканская, 7 – игниканская, 8 – кандыкская (номера образцов соответствуют табл. 4)

среднем 0.4 (табл. 4)), что указывает на накопление материнского ОВ в бассейне с глинистой седиментацией (Mello et al., 1988; Waples, Machihara, 1990, 1991; Петров, 1994) и не согласуется с литологией ряда карбонатных образцов. Возможно, битумоиды в карбонатных образцах являются аллохтонными или паравтохтонными, или диастераны накопились в них благодаря какому-то другому фактору, например, за счет катагенеза. По стеранам битумоиды в основном соответствуют слабо зрелому ОВ (коэффициент зрелости  $C_{29}\beta\beta(20S+20R)/C_{29}\alpha\alpha 20R < 3$ ), что противоречит заключению по результатам пиролиза (градации МК<sub>1</sub><sup>1</sup>-МК<sub>2</sub>). Однако стеранов в изученных битумоидах очень мало, и учитывая низкие выходы битумоида в целом, за исключением единичных образцов (в которых стераны не идентифицированы), к применению стерановых параметров надо подходить с осторожностью.

### Зависимость биомаркерных показателей от миграции

При изучении докембрийских образцов, в особенности высокопреобразованных или возможно высокопреобразованных термически, весьма актуален вопрос автохтонности битумоида, поэтому были построены графики зависимости биомаркерных параметров от битумоидного коэффициента для возможной прикидочной оценки влияния миграции на распределение УВ. Для ациклических насыщенных УВ не обнаруживается какой-либо отчетливой зависимости  $C_{27}/C_{17}$ , CPI и Pr/Ph от  $\beta$ . В стеранах (рис. 12) отмечается повышение доли S-форм по сравнению с R-формами при увеличении  $\beta$  в образцах малгинской и кандыкской свит, что может быть следствием большей катагенетической преобразованности аллохтонных примесей. В соотношении  $\beta\beta$ - и  $\alpha\alpha$ -изомеров наблюдается обратная тенденция для кандыкской и ципандинской свит, свидетельствующая, что привнесенное вещество менее преобразовано. Однако образцы ципандинской свиты являются автохтонными. Не исключено, что эти тенденции не являются истинными, а связаны с ошибкой из-за малых количеств стеранов. Соотношение прегнанов и стеранов в образцах малгинской свиты находятся в отчетливой прямо пропорциональной зависимости от процента битумоидов. Прегнаны, вероятно, более миграционноспособны, чем стераны и могут накапливаться в слабопроницаемых толщах (Конторович, Тимошина,

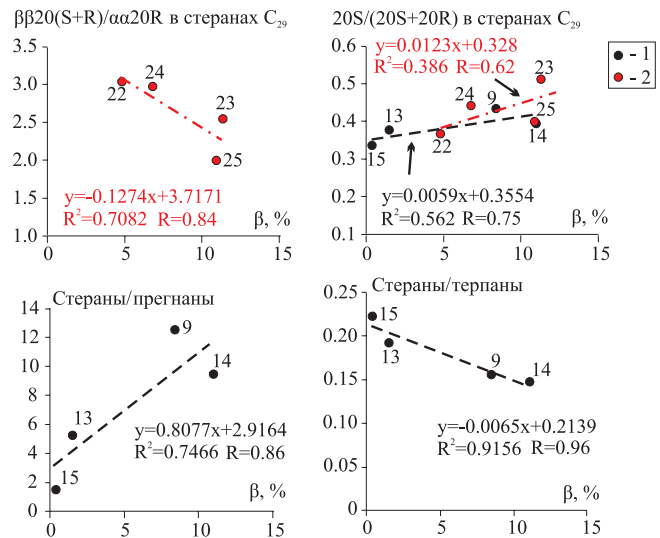


Рис. 12. Зависимость соотношений стеранов от аллохтонности битумоида в органическом веществе рифея из обнажений р. Мая (свиты: 1 – малгинская, 2 – кандыкская) с трендами (для малгинской свиты черная пунктирная линия, для кандыкской свиты красная пунктирная линия), номера образцов соответствуют табл. 2, 4

2009). В то же время высокие концентрации прегнанов характерны для морских, лагунных обстановок седиментации материнских толщ с повышенной соленостью (ten Haven et al., 1988). Прегнаны могут накапливаться по сравнению с разрушающимися стеранами  $C_{27-30}$  при высоком катагенезе, а также они более устойчивы при биodeградации, чем стераны (Peters et al., 2007). Вероятно, привнос битумоидов происходил из более погруженных толщ, при накоплении которых бассейн имел более высокую соленость вод, причем УВ могут быть несколько биodeградированными. Вместе с тем, снижение доли стеранов, источниками которых были эукариоты (Peters et al., 2007), по сравнению с терпанами, может указывать на более древний источник. В терпанах повышение  $T_s$  по сравнению с  $T_m$  в аллохтонных битумоидах, слабое снижение в гомогпанах концентраций  $C_{35}$  по сравнению с  $C_{34}$ , более отчетливое в конкретно малгинских образцах, некоторое повышение количества трицикланов по сравнению с гопанами с ростом битумоидного коэффициента (рис. 13) возможно связано с миграцией, поскольку более компактные молекулы мигрируют лучше. Возможными причинами прямо пропорциональной связи  $T_s/T_m$  с битумоидным коэффициентом является накопление исходного ОВ для аллохтонного битумоида в карбонатном осадке (Philp, 1983; Rüllkötter, Marzi, 1988), его диагенез в окислительной обстановке (Moldowan et al., 1986) и высокий катагенез (Waples, Machihara, 1990; van Graas et al., 1990; Петров, 1994). Слабо просматриваемая тенденция снижения трицикланового индекса с ростом  $\beta$  может быть связана с миграцией косвенно, в том случае, если аллохтонные примеси имеют более низкий трициклановый индекс, указывающий на более мористые условия накопления исходного ОВ (Конторович и др., 1999) или более высокий катагенез. Это может относиться и к повышению количества трицикланов по сравнению с гопанами, если примесь содержит много трицикланов в силу большей мористости источника или более высокого катагенеза (Петров, 1994).

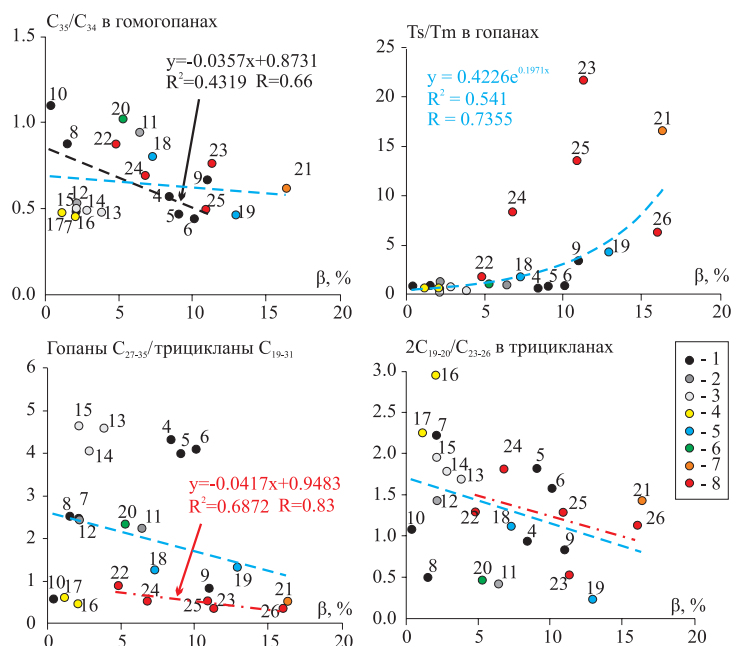


Рис. 13. Зависимость соотношений терпанов от аллохтонности битумоида в органическом веществе рифея из обнажений р. Мая (свиты: 1 – малгинская, 2 – малгинская и ципандинская, 3 – ципандинская, 4 – кумахинская, 5 – мильконская, 6 – нельканская, 7 – игниканская, 8 – кандыкская) с трендами для всех образцов (синяя пунктирная линия) и отдельно для малгинской (черная пунктирная линия) и кандыкской (красная пунктирная линия) свит. Номера образцов соответствуют табл. 2, 4

Итак, отчетливая связь с миграционными процессами проявлена для отношений стераны/прегнаны и стераны/терпаны малгинской свиты, содержащей как аллохтонные, так и автохтонные битумоиды. Тенденция для отношения стераны/прегнаны может указывать на привнос УВ (возможно биodeградированных) из более погруженных и с более высокой соленостью при накоплении ОВ толщ. Уменьшение концентраций стеранов по сравнению с терпанами при повышении битумоидного коэффициента может быть результатом поступления УВ из более древнего источника, более бедного эукариотами. Довольно расплывчатая тенденция снижения трицикланового индекса с повышением битумоидного коэффициента может указывать на привнос УВ, чьим источником было ОВ более мористого происхождения. Значительное увеличение  $Ts/Tm$  в аллохтонных битумоидах, возможно связано с привносом УВ из карбонатных толщ, где исходное ОВ имеет высокий катагенез и прошло диагенез в окислительной обстановке, хотя возможно и наложение чисто миграционных эффектов. Более высокий уровень катагенеза для мигрировавших УВ отражается и в повышении доли S-форм по сравнению с R-формами в стеранах (Han et al., 2017).

### Закключение

В изученных породах докембрия Алдано-Майской впадины обогащены  $C_{орг}$  (>1 %) и могут быть отнесены к нефтематеринским аргиллиты и алевролиты малгинской, ципандинской и кумахинской свит. Образцы остальных изученных свит бедны  $C_{орг}$  и битумоидами, причем битумоиды в них аллохтонные и смешанные, свидетельствующие о миграции нефтяных компонентов в изученных отложениях.

В образцах нефтематеринских малгинской и ципандинской свит отмечен наиболее высокий генерационный потенциал (НП составляет 267–511 мг УВ/г  $C_{орг}$ ). Катагенез ОВ малгинской и кумахинской свит, судя по  $T_{max}$ , соответствует  $MK_1^2$ , зрелость ОВ ципандинской и кандыкской свит ниже. Однако за счет возможного присутствия битумов в некоторых образцах НП может быть завышен, а  $T_{max}$  занижена.

На основании распределения УВ-биомаркеров биопредшественниками ОВ нефтематеринских кумахинской, ципандинской и малгинской свит были в основном разнообразные прокариоты, в том числе цианобактерии (гопаны, ациклические биомаркеры) и в меньшей степени авто- и гетеротрофные эукариоты (концентрации и распределение стеранов), обитавшие в морских (отсутствие биомаркеров континентального ОВ, распределение ациклических алканов, стеранов) докембрийских (12- и 13-монометилалканы) бассейнах, с глинистым осадконакоплением (высокие содержания диастеранов). Накопление малгинской свиты вероятно происходило частично до появления эукариот (отсутствие стеранов в ряде образцов). В битумоидах ципандинской и кумахинской свит и в половине битумоидов малгинской свиты повышены концентрации низкомолекулярных трицикланов ( $2C_{19-20}/C_{23-26} > 1$ ), что, возможно, связано со спецификой материнской биоты, хотя и не характерно для аквагенного ОВ.

Редкий гомологический ряд 2,7-диметилалканов, найденный в нескольких образцах малгинской свиты и в обоих образцах кумахинской свиты, не отмечен ни в одном образце ципандинской свиты, и, возможно, является признаком отличия ее биоты, условий ее накопления или эволюции в диагенезе и катагенезе. На отличие ципандинской свиты также указывает высокое содержание этилхолестанов ( $C_{29}/C_{27} = 2.5$ ) в ее углеродистом аргиллите.

Подобные отмеченным в образцах малгинской, ципандинской и кумахинской свит биомаркерные характеристики имеют в основном и аллохтонные, и смешанные битумоиды бедных ОВ образцов изученной коллекции (кроме битумонасыщенного песчаника кандыкской свиты). В них в основном повышен трициклановый индекс (>1); в ципандинском известняке обнаружены 12- и 13-монометилалканы; в карбонатах мильконской, нельканской свит и в 1 образце кандыкской свиты отмечены 2,7-диметилалканы. В нескольких аллохтонных битумоидах наблюдается значительное повышение содержания триснорнеогопана  $Ts$  по сравнению с трисноргопаном  $Tm$  ( $Ts/Tm > 3$ , в образцах игниканской и кандыкской свит – 6.2–21.7), которое невозможно объяснить ни высоким катагенезом, ни примесью более молодых террагенных УВ, что, возможно, связано с обстановками в диагенезе или с миграционными процессами.

От миграционных процессов (по крайней мере, от величины битумоидного коэффициента  $\beta$ ) в изученной коллекции в разной степени зависят отношения  $Ts/Tm$  в гопанах, гопаны  $C_{27-35}$ /трицикланы  $C_{19-31}$ ,  $2C_{19-20}/C_{23-26}$  в трицикланах,  $C_{35}/C_{34}$  в гомогопанах,  $20S/20R$  и  $\beta\beta 20(S+R)/\alpha\alpha 20R$  в стеранах  $C_{29}$ , стераны/прегнаны, стераны/терпаны. Вероятные искажения этих параметров при миграции и их причины имеет смысл исследовать на более обширной и разнообразной коллекции.

## Благодарности/Финансирование

Авторы благодарят К.Е. Наговицину и П.Н. Соболева за предоставление образцов пород и битумоидов для геохимических исследований, за консультации и обсуждение.

Авторы благодарны рецензенту за внимательное прочтение текста настоящей рукописи и ценные замечания. Рекомендованные исправления значительно улучшили статью.

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0022 «Органическая геохимия и история геологического развития доминантных нефтегазовых систем верхнего протерозоя и фанерозоя Сибири».

## Литература

- Баженова Т.К. (2010). Масштабы и время нефтегазообразования в верхнепротерозойских материнских формациях Сибирской платформы. *Успехи органической геохимии: Мат. Всерос. науч. конф.* Новосибирск: ИНГТ СО РАН, с. 27–30.
- Баженова Т.К., Белецкая С.Н., Беляева Л.С., Биккенина Д.А. и др. (1981). Органическая геохимия палеозоя и допалеозоя Сибирской платформы и прогноз нефтегазоносности. Ленинград: Недра, 211 с.
- Баженова Т.К., Дахнова М.В., Жеглова Т.П., Лебедев В.С. и др. (2014). Нефтематеринские формации, нефти и газы докембрия и нижнего – среднего кембрия Сибирской платформы. Москва: ВНИГНИ, 128 с.
- Баженова Т.К., Дахнова М.В., Можегова С.В. (2011). Верхний протерозой Сибирской платформы – основной источник нефтегазоносности её домезозойского мегабассейна. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*, 6(2), с. 1–21. [http://www.ngtr.ru/tub/1/17\\_2011.pdf](http://www.ngtr.ru/tub/1/17_2011.pdf).
- Дахнова М.В., Жеглова Т.П., Можегова С.В. (2013). Геохимия органического вещества нефтематеринских отложений рифея, венда и кембрия востока Сибирской платформы. *Нефтегазогеологический прогноз и перспективы развития нефтегазового комплекса Востока России: сб. мат. научно-практ. конф.* Санкт-Петербург: ВНИГРИ, с. 70–77.
- Дахнова М.В., Жеглова Т.П., Можегова С.В. (2014). Генерационные характеристики ОВ и распределение биомаркеров в битумоидах нефтематеринских пород рифея, венда и кембрия Сибирской платформы. *Геология и геофизика*, 55(5-6), с. 953–961. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.05.018>
- Каширцев В.А., Советов Ю.К., Костырева Е.А., Меленевский В.Н., Кучкина А.Ю. (2009). Новый томологический ряд молекул-биометок из вендских отложений Бирюсинского Присянья. *Геология и геофизика*, 50(6), с. 698–702. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2008.12.001>
- Ким Н.С. (2004). Опыт сравнительного исследования неопротерозойских нефтей Аравийской и Сибирской платформ. *Геология и геофизика*, 45(7), с. 924–933.
- Конторович А.Э., Бахтуров С.Ф., Башарин А.К. и др. (1999). Разновозрастные очаги нафтидообразования и нафтидонакопления на Северо-Азиатском кратоне. *Геология и геофизика*, 40(11), с. 1676–1693.
- Конторович А.Э., Изосимова А.Н., Конторович А.А., Хабаров Е.М., Тимошина И.Д. (1996). Геологическое строение и условия формирования гигантской Юрубчено-Тохомской зоны нефтегазонакопления в верхнем протерозое Сибирской платформы. *Геология и геофизика*, 37(8), с. 166–195.
- Конторович А.Э., Каширцев В.А., Меленевский В.Н., Тимошина И.Д. (2005). Состав углеводородов – биомаркеров в генетических семействах нефтей докембрия и кембрия Сибирской платформы. *ДАН*, 402(5), с. 651–655.
- Конторович А.Э., Мельников Н.В., Сурков В.С., Трофимук А.А. и др. (1994а). Нефтегазоносные бассейны и регионы Сибири. Вып.6. Байкитский регион. Новосибирск: ОИГГМ СО РАН, 52 с.
- Конторович А.Э., Сурков В.С., Трофимук А.А., Шемин Г.Г., Бакин В.Е. и др. (1994б). Нефтегазоносные бассейны и регионы Сибири. Вып. 7. Непско-Ботуобинский регион. Новосибирск: ОИГГМ СО РАН, 76 с.
- Конторович А.Э., Тимошина И.Д. (2009). Насыщенные углеводороды-биомаркеры в нефтях и битумонасыщенных породах докембрия Катангской нефтегазоносной области. *Геология нефти и газа*, 1, с. 90–98.
- Конторович А.Э., Тимошина И.Д., Соболев П.Н., Наговицин К.Е. (2012). Углеводороды-биомаркеры верхнего протерозоя Майской впадины (восток Сибирской платформы). *Мат. 8 Межд. конф.: Химия нефти и газа*, Томск, с. 192–196.
- Конторович А.Э., Тимошина И.Д., Филиппов Ю.А. (2011). Состав углеводородов-биомаркеров в нефтях рифея Байкитской антеклизы. *Геология нефти и газа*, 5, с. 78–83.
- Матвиенко Н.И., Соболев П.Н. (1984). Микроэлементы и органическое вещество в планктоногенных отложениях малгинской свиты юго-востока Сибирской платформы. *Ассоциация микроэлементов с органическим веществом в осадочных толщах Сибири: Сб. науч. тр.* Новосибирск: ИНГТ СО РАН, с. 69–77.
- Можегова С.В. (2010). Оценка генерационного потенциала докембрийских-нижнекембрийских нефтематеринских толщ Восточной Сибири с использованием данных пирролиза. *Успехи органической геохимии: Мат. Всерос. науч. конф.* Новосибирск: ИНГТ СО РАН, с. 231–233.
- Непско-Ботуобинская антеклизы – новая перспективная область добычи нефти и газа на востоке СССР (1986). Под ред. А.Э. Конторовича, В.С. Суркова, А.А. Трофимука. Новосибирск: Наука, 243с.
- Парфенова Т.М., Сулова Е.А., Меленевский В.Н., Наговицин К.Е., Сараев С.В. (2014). Органическая геохимия малгинской свиты среднего рифея (юго-восток Сибирской платформы). *Актуальные проблемы геологии нефти и газа Сибири: Мат. Всерос. науч. конф.* Новосибирск: ИНГТ СО РАН, с. 125–127.
- Парфенова Т. М., Сулова Е.А. (2019). Новые сведения о геохимии рассеянного органического вещества пород неопротерозоя на юго-востоке Сибирской платформы. *Межд. научно-практ. конф.: Новые идеи в геологии нефти и газа». Москва: МГУ, с.363–365.*
- Петров Ал.А. (1984). Углеводороды нефти. Москва: Наука, 263 с.
- Петров Ал.А. (1994). Геохимическая типизация нефтей. *Геохимия*, 6, с. 876–891.
- Решения Всесоюзного стратиграфического совещания по докембрию, палеозою и четвертичной системе Средней Сибири. Ч.1 (Верхний докембрий, нижний палеозой) (1983). (Ред. В.Е. Савицкий, В.И. Краснов, В.В. Хоментовский). Новосибирск, 215 с.
- Сафронов А.Ф., Чалая О.Н., Зуева И.Н., Глязнецова Ю.С., Лифшиц С.Х., Александров А.Р. (2015). Геохимия органического вещества рифейских отложений востока Алданской антеклизы. *Наука и образование*, (4), с. 13–18.
- Соболев П.Н. (1987). Геохимия доманикитной малгинской свиты Юдомо-Майской впадины. *Геология угленосных сланцев Сибири. Сборник научных трудов.* Новосибирск: СНИИГТиМС, с. 69–76.
- Соболев П.Н., Шиганова О.В., Дыхан С.В., Ахмедова А.Р. (2017). Новые данные о перспективах нефтегазоносности Алдано-Майской впадины. *Геология и геофизика*, 58(3-4), с. 643–656. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.03.002>
- Сулова Е.А., Парфенова Т.М., Меленевский В.Н., Наговицин К.Е., Сараев С.В. (2015). Черные сланцы малгинской свиты верхнего протерозоя – возможный источник нефтей и углеводородного сырья на юго-востоке Сибирской платформы. *Черные сланцы: геология, литология, геохимия, значение для нефтегазового комплекса, перспективы использования как альтернативного углеводородного сырья: Мат. Всерос. научно-практ. конф.* Якутск: Ахсаан, с. 186–191.
- Сулова Е.А., Парфенова Т.М., Сараев С.В., Наговицин К.Е. (2017). Органическая геохимия пород малгинской свиты мезопротерозоя и обстановки их формирования (юго-восток Сибирской платформы). *Геология и геофизика*, 58(3-4), с. 628–642. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.09.027>
- Тимошина И.Д. (2004). Геохимия органического вещества нефтепроизводящих пород и нефтей верхнего докембрия юга Восточной Сибири. *Геология и геофизика*, 45(7), с. 901–910.
- Тимошина И. Д. (2005). Геохимия органического вещества нефтепроизводящих пород и нефтей верхнего докембрия юга Восточной Сибири. Новосибирск: изд-во СО РАН, филиал «Гео», 166 с.
- Тимошина И.Д., Конторович А.Э., Наговицин К.Е. (2010). Состав углеводородов-биомаркеров в породах лахандинской серии (рифей) на востоке Сибирской платформы. *Мат. Всерос. науч. конф.: Успехи органической геохимии.* Новосибирск: ИНГТ СО РАН, с. 333–337.
- Тимошина И.Д., Болдушевская Л.Н., Лапочкина Е.С. (2015). Геохимия органического вещества рифея (малгинская, ципландинская, мильконская, нельканская и кандыкская свиты) на юго-востоке Сибирской платформы. *Черные сланцы: геология, литология, геохимия, значение для нефтегазового комплекса, перспективы использования как альтернативного углеводородного сырья: Мат. Всерос. научно-практ. конф.* Якутск: Ахсаан, с. 191–195.
- Тимошина И.Д. (2020). Насыщенные и ароматические углеводороды-биомаркеры в нефтях Байкитской антеклизы. *Известия ТПУ*, 331(1), с. 184–194.
- Тиссо Б., Вельте Д. (1981). Образование и распространение нефти. Москва: Мир, 502 с.
- Хоментовский В.В. (1996). Событийная основа стратиграфической шкалы неопротерозоя Сибири и Китая. *Геология и геофизика*, 37(8), с. 43–56.
- Чалая О.Н., Зуева И.Н., Сафронов А.Ф., Глязнецова Ю.С., Лифшиц С.Х. (2015). Геохимия органического вещества рифейских отложений востока Алданской антеклизы. *Черные сланцы: геология, литология, геохимия, значение для нефтегазового комплекса, перспективы использования как альтернативного углеводородного сырья: Мат. Всерос. научно-практ. конф.* Якутск: Ахсаан, с. 186–191.
- Шиганова О.В., Грибова И.С., Горбачев В.В. и др. (2015). Основные результаты изучения кембрийских, вендских и рифейских пород в параметрической скважине Усть-Майская 366 (1-й этап). *Мат. II*

научно-практ. конф.: *Геология, геофизика и минеральное сырье Сибири*. Т. 2. Новосибирск: СНИИГГиМС, с. 163–165.

Bazhenova O.K., Arefiev O.A. (1996). Geochemical peculiarities of Pre-Cambrian source rocks in the East European Platform. *Org. Geochem.*, 25, pp. 341–351. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(96\)00138-6](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(96)00138-6)

Berney C., Pawlowski J. (2006). A molecular time-scale for eukaryote evolution recalibrated with the continuous microfossil record. *Proc. R. Soc. London, Ser. B*, 273, pp. 1867–1872. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3537>

Blumenberg M., Thiel V., Riegel W., Kah L.C., Reitner J. (2012). Biomarkers of black shales formed by microbial mats, Late Mesoproterozoic (1.1 Ga) Taoudeni Basin, Mauritania. *Precamb. Res.*, 196–197, pp. 113–127. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.11.010>

Brocks J.J., Logan G.A., Buick R., Summons R.E. (1999). Archean Molecular Fossils and the Early Rise of Eukaryotes. *Science*, 285, pp. 1033–1036. <https://doi.org/10.1126/science.285.5430.1033>

Brocks J.J., Buick R., Summons R.E., Logan G.A. (2003). A reconstruction of Archean biological diversity based on molecular fossils from the 2.78 to 2.45 billion-year-old Mount Bruce Supergroup, Hamersley Basin, Western Australia. *Geochimica & Cosmochimica Acta*, 67(22), pp. 4321–4335. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(03\)00209-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(03)00209-6)

Brocks J.J., Jarrett A.J.M., Sirantoine E., Kenig F., Moczyłowska M., Porter S., Hope J. (2016). Early sponges and toxic protists: Possible sources of cryostane, an age diagnostic biomarker antedating Sturtian Snowball Earth. *Geobiology*, 14(2), pp. 129–149. <https://doi.org/10.1111/gbi.12165>

Brooks J.J., Jarrett A.J.M., Sirantoine E., Hallmann C., Hoshino Y., Liyanage T. (2017). The rise of algae in Cryogenian oceans and the emergence of animals. *Nature*, 548(7669), pp. 578–581. <https://doi.org/10.1038/nature23457>

van Graas G., Bass J.M.A., van de Graaf B., de Leeuw J.W. (1990). Theoretical organic geochemistry. The thermodynamic stability of several cholestane isomers calculated by molecular mechanics. *Geochimica & Cosmochimica Acta*, 46, pp. 2399–2402. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(82\)90211-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(82)90211-3)

Flannery E.N., George S.C. (2014). Assessing the syngeneity and indigeneity of hydrocarbons in the ~1.4 Ga Velkerri Formation, McArthur Basin, using slice experiments. *Org. Geochem.*, 77, pp. 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2014.10.008>

Grantham P.J., Lijmbach G.W.M., Posthuma J., Hughes-Clarke M.W., Willink R.J. (1988). Origin of crude oils in Oman. *J. Petrol. Geol.*, 11(1), pp. 61–80. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.1988.tb00801.x>

Han Y., Horsfield B., Curry D.J. (2017). 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.*, 85, pp. 106–116. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.04.018>

ten Haven H.L., de Leeuw J.W., Sinnighe Damste J.C., Schenck P.A., Palmer S.E., Zumberge J.E. (1988). Application of biological markers in the recognition of palaeohypersaline environments. *Lacustrine petroleum source rocks: Geol. Soc. Special Publ.*, (40), pp. 123–130. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1988.040.01.11>

Kontorovich A.E., Kashirtsev V.A., Timoshina I.D., Kim N.S. (2005). Geochemistry of Precambrian oils of Eurasia and Australia. *Petroleum Frontiers*, 20(3), pp. 11–26.

Kontorovich A.E., Kashirtsev V.A., Nagovitsin K.E., Sobolev P.N., Sukhoruchko V.I., Timoshina I.D. (2011a). The first findings of 12- and 13-monomethylalkanes in dispersed organic matter of Upper Proterozoic and Cambrian of Siberian platform. *The 25<sup>th</sup> Int. Meet. on Organic Geochemistry. Abstracts*. Rapiergroup, UK, p. 602.

Kontorovich A.E., Kashirtsev V.A., Nagovitsin K.E., Sobolev P.N., Sukhoruchko V.I., Timoshina I.D. (2011b). Mid-chain branched monomethylalkanes in Upper Proterozoic and Cambrian of Siberian platform. *Abstracts. III Int. Conf.: Biosphere Origin and Evolution*. Rethymno, Crete, Greece, pp. 165–166.

Kontorovich A., Timoshina I., Sobolev P., Nagovitsin K. (2013). Biogeochemistry of the Neoproterozoic organic matter in the South-East of

the Siberian platform. *Abstracts. 26th Int. Meet. on Organic Geochemistry*. Costa Adeje, Tenerife, Spain, v. 2, pp. 255–256.

Luo G., Hallmann C., Xie S., Ruan X., Summons R. (2015). Comparative microbial diversity and redox environments of black shale and stromatolite facies in the Mesoproterozoic Xiamaling Formation. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 151, pp. 150–167. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.12.022>

Mello M.R., Telnaes N., Gaglianone P.C., Chicarelli M.I., Brassell S.S., Maxwell J.R. (1988). Organic geochemical characterisation of depositional palaeoenvironments of source rocks and oils in Brazilian marginal basins. *Organic Geochemistry*, 13(1), pp. 31–46. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(88\)90023-X](https://doi.org/10.1016/0146-6380(88)90023-X)

Moldowan J.M., Sundarar P., Schoell M. (1986). Sensitivity of biomarker properties to depositional environment and/or source input in the Lower Toarcian of S.W. Germany. *Organic Geochemistry*, 10, pp. 915–926. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(86\)80029-8](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(86)80029-8)

Peters K.E., Moldowan J.M. (1993). The biomarker guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments. New Jersey, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 363 p.

Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M. (2007). The biomarker guide. Cambridge University Press, 1155 p.

Philp R.P. (1983). Correlation of crude oils from the San Jorge Basin, Argentina. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47, pp. 267–275. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(83\)90139-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(83)90139-4)

Philp R.P. (1985). Fossil fuel biomarkers. Amsterdam: Elsevier, 294 p.

Philp R.P., Gilbert T.D. (1986). Biomarker distribution in Australian oils predominantly derived from terrigenous source material. *Organic Geochemistry*, 10, pp. 73–84. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(86\)90010-0](https://doi.org/10.1016/0146-6380(86)90010-0)

Pratt L.M., Summons R.E., Hieshima G.B. (1991). Sterane and triterpane biomarkers in the Precambrian Nonesuch Formation, North American Midcontinent Rift. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55, pp. 911–916. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(91\)90351-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(91)90351-5)

Rüllkötter J., Marzi R. (1988). Natural and artificial of biological markers in a Toarcian shale from northern Germany. *Organic Geochemistry*, 13, pp. 639–645. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(88\)90084-8](https://doi.org/10.1016/0146-6380(88)90084-8)

Summons R.E., Walter M.R. (1990). Molecular fossils and microfossils of prokaryotes and protists from Proterozoic sediments. *Am. J. Sci.*, 290-A, pp. 212–244.

Volkman J.K., Alexander R., Kagi R.I., Noble R.A., Woodhouse G.W. (1983). A geochemical reconstruction of oil generation in the Barrow Sub-basin of Western Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47, pp. 2071–2106. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(83\)90034-0](https://doi.org/10.1016/0016-7037(83)90034-0)

Waples D.W., Machihara T. M. (1990). Application of sterane and triterpane biomarkers in petroleum exploration. *Bull. Can. Petrol. Geol.*, 38(3), pp. 357–380.

Waples D.W., Machihara T. (1991). Biomarkers for geologists – a practical guide to the application of steranes and triterpanes in petroleum geology. *AAPG Methods in explorations*, 9, 91 p.

## Сведения об авторах

*Ирина Дмитриевна Тимошина* – канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимкуа СО РАН

Россия, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, д. 3

*Людмила Николаевна Болдушевская* – канд. геол.-мин. наук, доцент, начальник отдела региональной геологии и ГРП, ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть»

Россия, 660098, Красноярск, ул. 9 мая, д. 65Д

Статья поступила в редакцию 14.02.2020;

Принята к публикации 13.08.2020; Опубликована 11.12.2020

IN ENGLISH

## Geochemistry of neoproterozoic organic matter in the southeast of the Siberian platform

I.D. Timoshina<sup>1\*</sup>, L.N. Boldushevskaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup>RN-KrasnoyarskNIPIneft LLC, Krasnoyarsk, Russian Federation

\*Corresponding author: Irina D. Timoshina, e-mail: TimoshinaID@ipgg.sbras.ru

**Abstract.** In the Neoproterozoic of the Aldan-Maya depression, the rocks of the Malgin (MF), Tsipanda (TF) and Kumakha (KF) Formations are enriched in organic matter (OM) and can be classified

as source rocks. High generation potential is typical for the MF and TF (267–511 mg HC/g TOC). The thermal maturity level of OM corresponds to MC<sub>1</sub><sup>2</sup> grade (T<sub>max</sub> is 438–443°C). Based on the

biomarker distribution, the biological precursors of OM in these formations are mostly prokaryotes, including cyanobacteria (hopanes, acyclic biomarkers) and to a lesser extent eukaryotes (the presence of steranes  $C_{27}$ - $C_{30}$ ) that lived in the Precambrian (the presence of 12- and 13-monomethylalkanes) marine (absence of continental biomarkers, the distributions of acyclic alkanes and steranes) basin with clayey sedimentation (high content of diasteranes). The absence of steranes in some samples (the absence of eukaryotes in the source OM), the MF is likely to have been partly deposited before the emergence of eukaryotes. Most samples have elevated concentrations of low-molecular tricyclanes ( $2C_{19-20}C_{23-26} > 1$ ), which can be attributed to the specificity of the source biota, although it is not typical for marine OM. A rare homologous series of 2,7-dimethylalkanes that has been recently found by other researchers in some Precambrian strata is present in several samples of the MF and KF and totally absent from all samples of the TF. This may indicate the differences in its biota, depositional environments or its evolution during diagenesis and catagenesis. A distinctive feature of the TF is the high content of ethylcholestanes ( $C_{29}/C_{27} = 2.5$ ).

**Keywords:** Siberian platform, Precambrian, oil source formations, organic geochemistry, biomarker hydrocarbons

**Recommended citation:** Timoshina I.D., Boldushevskaya L.N. (2020). Geochemistry of neoproterozoic organic matter in the southeast of the Siberian platform. *Georesursy = Georesources*, 22(4), pp. 41–54. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.4.41-54>

#### Acknowledgments

The authors are grateful to K.E. Nagovitsin and P.N. Sobolev for providing samples of rocks and bitumoids for geochemical research, for consultation and discussion.

The authors are grateful to the referee for carefully reading the manuscript and for valuable comments.

This work was supported by the FSR project No. 0331-2019-0022 «Organic geochemistry and the history of geological development of the dominant oil and gas systems of the Upper Proterozoic and Phanerozoic of Siberia».

#### References

- Bazhenova T.K. (2010). The scale and time of oil and gas formation in the Upper Proterozoic source formations of the Siberian platform. *Advances in Organic Geochemistry: Proc. All-Russ. sci. conf.* Novosibirsk: IPGG SB RAS, pp. 27–30. (In Russ.)
- Bazhenova O.K., Arefiev O.A. (1996). Geochemical peculiarities of Pre-Cambrian source rocks in the East European Platform. *Org. Geochem.*, 25, pp. 341–351. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(96\)00138-6](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(96)00138-6)
- Bazhenova T.K., Beletskaya S.N., Belyayeva L.S. et al. (1981). Organic geochemistry of the Paleozoic and Pre-Paleozoic Siberian platform and oil and gas potential. Leningrad: Nedra, 211 p. (In Russ.)
- Bazhenova T.K., Dakhnova M.V., Zheglova T.P. et al. (2014). Oil and gas source formations, oil and gases of the Precambrian and lower-middle Cambrian of the Siberian platform. Moscow: VNIGNI, 128 p. (In Russ.)
- Bazhenova T.K., Dakhnova M.V., Mozhegova S.V. (2011). The Upper Proterozoic of the Siberian Platform is the main source of oil and gas in its pre-Mesozoic megabasin. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika = Oil and gas geology. Theory and Practice*, 6(2), pp. 1–21. (In Russ.). [http://www.ngtp.ru/rub/1/17\\_2011.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/1/17_2011.pdf)
- Berney C., Pawlowski J. (2006). A molecular time-scale for eukaryote evolution recalibrated with the continuous microfossil record. *Proc. R. Soc. London, Ser. B*, 273, pp. 1867–1872. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3537>
- Blumenberg M., Thiel V., Riegel W., Kah L.C., Reitner J. (2012). Biomarkers of black shales formed by microbial mats, Late Mesoproterozoic (1.1 Ga) Taoudeni Basin, Mauritania. *Precamb. Res.*, 196–197, pp. 113–127. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.11.010>
- Brocks J. J., Logan G. A., Buick R., Summons R.E. (1999). Archean Molecular Fossils and the Early Rise of Eukaryotes. *Science*, 285, pp. 1033–1036. <https://doi.org/10.1126/science.285.5430.1033>
- Brocks J.J., Buick R., Summons R.E., Logan G.A. (2003). A reconstruction of Archean biological diversity based on molecular fossils from the 2.78 to 2.45 billion-year-old Mount Bruce Supergroup, Hamersley Basin, Western Australia. *Geochimica & Cosmochimica Acta*, 67(22), pp. 4321–4335. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(03\)00209-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(03)00209-6)
- Brocks J.J., Jarrett A.J.M., Sirantoine E., Kenig F., Moczyłowska M., Porter S., Hope J. (2016). Early sponges and toxic protists: Possible sources of cryostane, an age diagnostic biomarker antedating Sturtian Snowball Earth. *Geobiology*, 14(2), pp. 129–149. <https://doi.org/10.1111/gbi.12165>
- Brocks J.J., Jarrett A.J.M., Sirantoine E., Hallmann C., Hoshino Y., Liyanage T. (2017). The rise of algae in Cryogenian oceans and the emergence of animals. *Nature*, 548(7669), pp. 578–581. <https://doi.org/10.1038/nature23457>
- Chalaya O.N., Zuyeva I.N., Safronov A.F., Glyaznetsova YU.S., Lifshits S.K.H. (2015). Geochemistry of organic matter of Riphean deposits of the east of the Aldan antecline. *Black shales: geology, lithology, geochemistry, importance for the oil and gas complex, prospects for use as an alternative hydrocarbon raw material: Proc. All-Russ. sci.-pract. conf.* Yakutsk: Akhsaan, pp. 186–191. (In Russ.)
- Dakhnova M.V., Zheglova T.P., Mozhegova S.V. (2013). Geochemistry of organic matter of oil source deposits of Riphean, Vendian and Cambrian of the east of the Siberian platform. *Sci.-pract. Conf.: Oil and gas geological forecast and development prospects of the oil and gas complex of the East of Russia. Coll. papers.* St. Petersburg: VNIGNI, pp. 70–77. (In Russ.)
- Dakhnova M.V., Zheglova T.P., Mozhegova S.V. (2014). Generation characteristics of organic matter and the distribution of biomarkers in the bitumoids of the Riphean, Vendian, and Cambrian source rocks of the Siberian Platform. *Russian Geology and Geophysics*, 55(5-6), pp. 755-762. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.05.018>
- Decisions of the All-Union Stratigraphic Conference on Precambrian, Paleozoic and Quaternary System of Central Siberia. Part 1. Upper Precambrian, Lower Paleozoic. (1983). Ed. V.Ye. Savitskiy, V.I. Krasnov, V.V. Khomentovskiy. Novosibirsk, 215 p. (In Russ.)
- van Graas G., Bass J.M.A., van de Graaf B., de Leeuw J.W. (1990). Theoretical organic geochemistry. The thermodynamic stability of several cholestane isomers calculated by molecular mechanics. *Geochimica & Cosmochimica Acta*, 46, pp. 2399–2402. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(82\)90211-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(82)90211-3)
- Flannery E.N., George S.C. (2014). Assessing the syngeneity and indigeneity of hydrocarbons in the ~1.4 Ga Velkerri Formation, McArthur Basin, using slice experiments. *Org. Geochem.*, 77, pp. 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2014.10.008>
- Grantham P.J., Lijmbach G.W.M., Posthuma J., Hughes-Clarke M.W., Willink R.J. (1988). Origin of crude oils in Oman. *J. Petrol. Geol.*, 11(1), pp. 61–80. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.1988.tb00801.x>
- Han Y., Horsfield B., Curry D.J. (2017). 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.*, 85, pp. 106–116. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.04.018>
- ten Haven H.L., de Leeuw J.W., Sinninghe Damste J.C. Schenck P. A., Palmer S. E., Zumberge J. E. (1988). Application of biological markers in the recognition of palaeohypersaline environments. *Lacustrine petroleum source rocks: Geol. Soc. Special Publ.*, (40), pp. 123–130. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1988.040.01.11>
- Kashirtsev V.A., Sovetov YU.K., Kostyreva Ye.A., Melenevskii V.N., Kuchkina A.YU. (2009). New homologous series of biomarker molecules from Vendian deposits of the Sayan-adjacent Biryusa area. *Russian Geology and Geophysics*, 50(6), pp. 541-545. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2008.12.001>
- Khomentovskiy V.V. (1996). The event basis of the stratigraphic scale of the Neoproterozoic of Siberia and China. *Geologiya i geofizika*, 37(8), pp. 43–56. (In Russ.)
- Kim N.S. (2004). The experience of a comparative study of neoproterozoic oils of the Arabian and Siberian platforms. *Geologiya i geofizika = Russian Geology and Geophysics*, 45(7), pp. 924–933. (In Russ.)
- Kontorovich A.E., Bakhturov S.F., Basharin A.K. et al. (1999). Heterochronous Centers of Naphthide Formation and Accumulation in the North Asian Craton. *Geologiya i geofizika = Russian Geology and Geophysics*, 40(11), pp. 1647–1665. (In Russ.)
- Kontorovich A.E., Izosimova A.N., Kontorovich A.A., Khabarov Ye.M., Timoshina I.D. (1996). Geological structure and formation conditions of the giant Yurubcheno-Tokhomskeye oil and gas accumulation zone in the Upper Proterozoic of the Siberian Platform. *Geologiya i geofizika = Russian Geology and Geophysics*, 37(8), pp. 166–195. (In Russ.)
- Kontorovich A.E., Kashirtsev V.A., Melenevskii V.N., Timoshina I.D. (2005). The composition of biomarker hydrocarbons in the genetic families of oils of the Precambrian and Cambrian Siberian platform. *Doklady Earth Sciences*, 403(5), pp. 715-718.
- Kontorovich A.E., Melnikov N.V., Surkov V.S., Trofimuk A.A. et al. (1994a). Oil and gas basins and regions of Siberia. Is. 6. Baikit region. Novosibirsk: UIGGM SB RAS, 52 p. (In Russ.)
- Kontorovich A.E., Surkov V.S., Trofimuk A.A. et al. (1994b). Neftegazonosnyye basseyny i regiony Sibiri. Is. 7. Nepa-Botuoba region. Novosibirsk, UIGGM SB RAS, 76 p. (In Russ.)
- Kontorovich A.E., Timoshina I.D. (2009). Saturated biomarker hydrocarbons in oils and bitumen-saturated rocks of Precambrian of the Katanga oil and gas region. *Geologiya nefi i gaza = Russian Oil and Gas Geology*, 1, pp. 90–98. (In Russ.)

- Kontorovich A.E., Timoshina I.D., Sobolev P.N., Nagovitsin K.Ye. (2012). Biomarker hydrocarbons of the Upper Proterozoic of the May Depression (east of the Siberian Platform). *Proc. 8th Int. Conf.: Chemistry of Oil and Gas*. Tomsk, pp. 192–196. (In Russ.)
- Kontorovich A.E., Timoshina I.D., Filiptsov YU.A. (2011). Composition of biomarker hydrocarbons in Riphean oils of the Baikitsky antecline. *Geologiya nefi i gaza = Russian Oil and Gas Geology*, 5, pp. 78–83.
- Kontorovich A.E., Kashirtsev V.A., Timoshina I.D., Kim N.S. (2005). Geochemistry of Precambrian oils of Eurasia and Australia. *Petroleum Frontiers*, 20(3), pp. 11–26.
- Kontorovich A.E., Kashirtsev V.A., Nagovitsin K.E., Sobolev P.N., Sukhoruchko V.I., Timoshina I.D. (2011a). The first findings of 12- and 13-monomethylalkanes in dispersed organic matter of Upper Proterozoic and Cambrian of Siberian platform. *The 25<sup>th</sup> Int. Meet. on Organic Geochemistry. Abstracts*. Rapiergroup, UK, p. 602.
- Kontorovich A.E., Kashirtsev V.A., Nagovitsin K.E., Sobolev P.N., Sukhoruchko V.I., Timoshina I.D. (2011b). Mid-chain branched monomethylalkanes in Upper Proterozoic and Cambrian of Siberian platform. *Abstracts. III Int. Conf.: Biosphere Origin and Evolution*. Rethymno, Crete, Greece, pp. 165–166.
- Kontorovich A., Timoshina I., Sobolev P., Nagovitsin K. (2013). Biogeochemistry of the Neoproterozoic organic matter in the South-East of the Siberian platform. *Abstracts. 26th Int. Meet. on Organic Geochemistry*. Costa Adeje, Tenerife, Spain, v. 2, pp. 255–256.
- Luo G., Hallmann C., Xie S., Ruan X., Summons R. (2015). Comparative microbial diversity and redox environments of black shale and stromatolite facies in the Mesoproterozoic Xiamaling Formation. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 151, pp. 150–167. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.12.022>
- Matviyenko N.I., Sobolev P.N. (1984). Microelements and organic matter in planktonogenic deposits of the Malgin Formation in the southeast of the Siberian Platform. *The association of trace elements with organic matter in the sedimentary strata of Siberia: Coll. papers*. Novosibirsk: IPGG SB RAS, pp. 69–77. (In Russ.)
- Mello M.R., Telnaes N., Gaglianone P.C. Chicarelli M.I., Brassell S.S., Maxwell J.R. (1988). Organic geochemical characterisation of depositional palaeoenvironments of source rocks and oils in Brazilian marginal basins. *Organic Geochemistry*, 13(1), pp. 31–46. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(88\)90023-X](https://doi.org/10.1016/0146-6380(88)90023-X)
- Moldowan J.M., Sundarar P., Schoell M. (1986). Sensitivity of biomarker properties to depositional environment and/or source input in the Lower Toarcian of S.W. Germany. *Organic Geochemistry*, 10, pp. 915–926. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(86\)80029-8](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(86)80029-8)
- Mozhegova S.V. (2010). Assessment of the generation potential of Precambrian-Lower Cambrian oil source strata of Eastern Siberia using pyrolysis data. *Advances in Organic Geochemistry: Proc. All-Russ. sci. conf.* Novosibirsk: IPGG SB RAS, pp. 231–233. (In Russ.)
- Nepa-Botuoba antecline is a new promising area for oil and gas production in the east of the USSR. (1986). Ed. A.E. Kontorovich, V.S. Surkov, A.A. Trofimuk. Novosibirsk: Nauka, 243 p. (In Russ.)
- Parfenova T.M., Suslova Ye.A., Melenevskiy V.N., Nagovitsin K.Ye., Sarayev S.V. (2014). Organic Geochemistry of the Malgin Formation of the Middle Riphean (southeast of the Siberian Platform). *Actual problems of the oil and gas geology of Siberia: Proc. All-Russ. sci. conf.* Novosibirsk: IPGG SB RAS, pp. 125–127. (In Russ.)
- Parfenova T. M., Suslova Ye.A. (2019). New information on the geochemistry of dispersed organic matter of Neoproterozoic rocks in the southeast of the Siberian platform. *Int. sci.-pract. conf.: New ideas in the geology of oil and gas*. Moscow: MSU, pp. 363–365. (In Russ.)
- Peters K.E., Moldowan J.M. (1993). The biomarker guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments. New Jersey, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 363 p.
- Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M. (2007). The biomarker guide. Cambridge University Press, 1155 p.
- Petrov A.I. (1984). Oil hydrocarbons. Moscow: Nauka, 263 p. (In Russ.)
- Petrov A.I. (1994). Geochemical typification of oils. *Geokhimiya*, 6, pp. 876–891. (In Russ.)
- Philp R.P. (1983). Correlation of crude oils from the San Jorge Basin, Argentina. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47, pp. 267–275. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(83\)90139-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(83)90139-4)
- Philp R.P. (1985). Fossil fuel biomarkers. Amsterdam: Elsevier, 294 p.
- Philp R.P., Gilbert T.D. (1986). Biomarker distribution in Australian oils predominantly derived from terrigenous source material. *Organic Geochemistry*, 10, pp. 73–84. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(86\)90010-0](https://doi.org/10.1016/0146-6380(86)90010-0)
- Pratt L.M., Summons R.E., Hieshima G.B. (1991). Sterane and triterpane biomarkers in the Precambrian Nonesuch Formation, North American Midcontinent Rift. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55, pp. 911–916. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(91\)90351-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(91)90351-5)
- Rüllkötter J., Marzi R. (1988). Natural and artificial of biological marks in a Toarcian shale from northern Germany. *Organic Geochemistry*, 13, pp. 639–645. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(88\)90084-8](https://doi.org/10.1016/0146-6380(88)90084-8)
- Safronov A.F., Chalaya O.N., Zuyeva I.N., Glyaznetsova YU.S., Lifshits S.K.H., Aleksandrov A.R. (2015). Geochemistry of organic matter of Riphean deposits of the east of the Aldan antecline. *Nauka i obrazovaniye*, (4), pp. 13–18. (In Russ.)
- Shiganova O.V., Gribova I.S., Gorbachev V.V. et al. (2015). The main results of the study of Cambrian, Vendian and Riphean rocks in the parametric well Ust-Mayskaya 366 (stage 1). *Proc. II Sci. and Pract. Conf.: Geology, Geophysics and Mineral Resources of Siberia*, vol. 2. Novosibirsk: SNIIGGIMS, pp. 163–165. (In Russ.)
- Sobolev P.N. (1987). Geochemistry of the Domanik Malgin Formation of the Yudomo-May Depression. *Geology of coal shales of Siberia: Coll. papers*. Novosibirsk: SNIIGGIMS, pp. 69–76. (In Russ.)
- Sobolev P.N., Shiganova O.V., Dykhan S.V., Akhmedova A.R. (2017). New data on the petroleum potential of the Aldan-Maya depression. *Russian Geology and Geophysics*, 58(3-4), pp. 529-540. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.03.002>
- Summons R.E., Walter M.R. (1990). Molecular fossils and microfossils of prokaryotes and protists from Proterozoic sediments. *Am. J. Sci.*, 290-A, pp. 212–244.
- Suslova Ye.A., Parfenova T.M., Melenevskiy V.N., Nagovitsin K.Ye., Sarayev S.V. (2015). The black shales of the Malgin Formation of the Upper Proterozoic are a possible source of oils and hydrocarbons in the southeast of the Siberian Platform. *Black shales: geology, lithology, geochemistry, importance for the oil and gas complex, prospects for use as an alternative hydrocarbon raw material: Proc. All-Russ. sci.-pract. conf.* Yakutsk: Akhsaan, pp. 186–191. (In Russ.)
- Suslova Ye.A., Parfenova T.M., Sarayev S.V., Nagovitsin K.Ye. (2017). Organic geochemistry of rocks of the Malgin Formation of the Mesoproterozoic and the conditions of their formation (southeast of the Siberian Platform). *Russian Geology and Geophysics*, 58(3-4), pp. 516-528. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.09.027>
- Timoshina I.D. (2004). Geochemistry of the organic matter of oil-producing rocks and oils of the Upper Precambrian south of Eastern Siberia. *Geologiya i geofizika*, 45(7), pp. 901–910. (In Russ.)
- Timoshina I.D. (2005). Geochemistry of organic matter of oil-producing rocks and oils of the Upper Precambrian south of Eastern Siberia. Novosibirsk: SB RAS, filial «Geo», 166 p. (In Russ.)
- Timoshina I.D., Kontorovich A.E., Nagovitsin K.Ye. (2010). The composition of biomarker hydrocarbons in the rocks of the Lahanda series (Riphean) in the east of the Siberian platform. *Proc. All-Russ. sci. conf.: Advances in Organic Geochemistry*. Novosibirsk: IPGG SB RAS, pp. 333–337. (In Russ.)
- Timoshina I.D., Boldushevskaya L.N., Lapochkina Ye.S. (2015). Geochemistry of Riphean organic matter (Malgin, Tsipanda, Milkon, Nelkan and Kandyk formations) in the southeast of the Siberian platform. *Black shales: geology, lithology, geochemistry, importance for the oil and gas complex, prospects for use as an alternative hydrocarbon raw material: Proc. All-Russ. sci.-pract. conf.* Yakutsk: Akhsaan, pp. 191–195. (In Russ.)
- Timoshina I.D. (2020). Saturated and aromatic biomarker hydrocarbons in oils of the Baikit antecline. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 331(1), pp. 184–194. (In Russ.)
- Tissot, B.P., Welte, D.H. (1984). Petroleum formation and occurrence. Berlin Heidelberg, Springer, 702 p. (In Russ.)
- Volkman J.K., Alexander R., Kagi R.L., Noble R.A., Woodhouse G.W. (1983). A geochemical reconstruction of oil generation in the Barrow Sub-basin of Western Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47, pp. 2071–2106. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(83\)90034-0](https://doi.org/10.1016/0016-7037(83)90034-0)
- Waples D.W., Machihara T. M. (1990). Application of sterane and triterpane biomarkers in petroleum exploration. *Bull. Can. Petrol. Geol.*, 38(3), pp.357–380.
- Waples D.W., Machihara T. (1991). Biomarkers for geologists – a practical guide to the application of steranes and triterpanes in petroleum geology. *AAPG Methods in explorations*, 9, 91 p.

**About the Authors**

*Irina D. Timoshina* – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
3, Acad. Koptyug ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

*Lyudmila N. Boldushevskaya* – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Head of the Department of Regional Geology and Geological Exploration, RN-KrasnoyarskNIPIneft LLC  
65D, 9 May st., Krasnoyarsk, 660098, Russian Federation

Manuscript received 14 February 2020;  
Accepted 13 August 2020; Published 11 December 2020